
**Programme de recherche
chaleur ambiante et rejets thermiques;
installations chaleur-force**

Promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie par PINCHLENI.

Préparé par

Dr. François Maréchal et Prof. Daniel Favrat
Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI)
Institut des Sciences de l'Energie (ISE)
Faculté des Sciences et Techniques de l'ingénieur (STI)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne (EPFL)

Avec les contributions de

Dr. Pierre Krummenacher (Planair s.a.)
Dr. Alex Molyneaux (OFTTECH s.a.)
Ahmed Boulaïch et Julien Godat (LENI – ISE – STI – EPFL)

<http://leniwww.epfl.ch>

Sur mandat de
l'Office fédéral de l'énergie

Résumé

Un système de promotion et de diffusion des outils d'intégration énergétique a été développé. Ce système combine le logiciel PINCHLENI développé à l'EPFL et la plateforme EXSYS (développée initialement par l'Université de Liège dans le cadre d'un projet Européen). Ce système constitue une plateforme logicielle performante d'aide à la décision basée sur l'application des techniques du pincement pour une utilisation plus rationnelle de l'énergie dans les procédés industriels.

Le développement d'un site web permet le téléchargement gratuit du logiciel moyennant l'acceptation des conditions générales d'utilisation et l'inscription à une base de données. Cette base de données permettra dans l'avenir de tenir les utilisateurs du logiciel PINCHLENI-EXSYS informé des nouveautés et des activités dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que de la mise à disposition de résultats de projets de démonstration. Le site web développé dans le cadre de ce projet comprend une base de données des utilisateurs, un système de téléchargement du logiciel, un système de questions fréquentes ainsi qu'un système intégré de gestion des erreurs (bugs logiciels) pour une gestion plus efficace de la maintenance des logiciels développé par le LENI.

La version WINDOWS de la plateforme de calcul PINCHLENI a été fiabilisée et une interface avec le logiciel EXSYS a été développée. Par ce développement, le logiciel permet de traiter de manière efficace les problèmes d'intégration des utilitaires comprenant la combustion, les unités de cogénération, les pompes à chaleurs, les cycles de Rankine (réseau vapeur et cycles à fluide organique) ainsi que les cycles de réfrigération. Comme démontré par une étude réalisée dans ce projet, ce système est particulièrement bien adapté pour résoudre des problèmes de grande taille tels que l'intégration des sites industriels.

Un didacticiel d'apprentissage de la plateforme a été développé. Ce didacticiel se compose d'un ensemble de documents hypertextes destinés à favoriser l'auto apprentissage de l'utilisation du logiciel. Ce didacticiel s'appuie sur un ensemble de documents d'aide en ligne comprenant le manuel des utilisateurs, un ensemble de documents présentant les fondements théoriques et le système de questions fréquentes avec un moteur de recherche.

Les résultats de ce travail se trouvent sur le site du LENI (<http://leniwww.epfl.ch/>)

Abstract

A computer system for the promotion of the rational use of energy in the industry has been developed. It combines the PINCHLENI software developed by the LENI (laboratory of Industrial Energy Systems) of the Swiss Federal Institute of Technology (Lausanne) and the web based platform EXSYS developed initially by the LASSC (Laboratory for the Analysis and the Synthesis of Chemical Systems) at the University of Liège (B) with the support of the European commission. It represents an efficient platform for solving process integration problems.

A web site allowing free download of the tools has been developed. It includes a users data base, a FAQ and a bug reporting section that will allow a more efficient and easier maintenance of the software tools.

The Windows version of PINCHLENI has been stabilized and a communication interface with the EXSYS platform has been developed. This system is an efficient system for computing the process integration including the optimal integration of energy conversion technologies like combustion, gas turbines, steam network, Rankine cycles, heat pumps and refrigeration cycles. This system is particularly well suited for solving site scale problems (as demonstrated in an industrial site application solved during this project).

A courseware (in English language) helps learning the utilisation of the software. It is composed of online manuals and teaching materials for the theoretical backgrounds, a FAQ list with a search engine as well as a hypertext tutorial document illustrating the application of the two computer platforms for solving a small example.

Results of this research project will be found on the LENI web site (<http://leniwww.epfl.ch/>).

Zusammenfassung

In diesem Projekt wurde ein System zur Förderung rationeller Energienutzung in industriellen Anwendungen aufgebaut. Dieses beinhaltet die am LENI (Labor für Industrielle Energietechnik an der ETH Lausanne) entwickelte Software PINCHLENI, sowie die Web basierte Plattform EXSYS, welche am LASSC (Labor für Analyse und Synthese chemischer Prozesse, Universität Lüttich, B) im Rahmen eines europäischen Forschungsprogrammes erstellt wurde. Mit dieser Software können rationelle Lösungen von Prozess-Integrations Problemen sehr schnell gefunden werden.

Auf einer Web Seite stehen zum freien Download die verschiedenen Werkzeuge zur Verfügung. Diese beinhaltet ebenfalls eine Benutzer-Datenbank, eine FAQ (häufig gestellte Fragen) und eine interaktive Seite mit der Auflistung auftretender Probleme und Fehler, mithilfe dieser die Software auf eine effiziente Art und Weise verbessert werden kann.

Eine stabile Windows Version des Programms PINCHLENI inkl. einer Schnittstelle zur Plattform EXSYS wurde entwickelt. Dieses Packet ermöglicht eine effiziente Vorgehensweise zur Untersuchung der optimalen Integration in der Verfahrenstechnik und bei Energieumwandlungsprozessen mit Elementen aus der Verbrennungstechnik, mit Gasturbinen, in Dampfnetzwerken, bei Rankine Prozessen und Wärmepumpen und bei kältetechnischen Anlagen. Insbesondere eignet sich das System zur Behandlung von Verbundanlagen (siehe Beispiel einer industriellen Anlage in diesem Bericht).

Unterrichtsunterlagen (in englischer Sprache) stehen zur Verfügung. Diese bestehen aus einem online verfügbaren Benutzerhandbuch, einer Einführung in die theoretischen Grundlagen, sowie einem Tutorial mit einem kleinen Anwendungsbeispiel.

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'office fédéral de l'énergie. L'auteur est seul responsable du contenu et des conclusions.

Table des matières

Promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie par PINCHLENI.....	1
Résumé	i
Table des matières.....	3
1 Motivation / Situation.....	4
2 Objectifs du projet.....	4
3 Description du travail réalisé	5
4 Principaux résultats obtenus	6
4.1 Plateforme de distribution du logiciel PINCHLENI.....	6
4.2 Principe de téléchargement du logiciel.....	7
4.3 Accès au logiciel EXSYS.....	8
4.3.1 Module de lecture des données PINCHLENI	9
4.3.2 Module de téléchargement des données PINCHLENI	10
4.3.3 Module de calcul de l'intégration des utilitaires de PINCHLENI	11
4.3.4 Module de calcul de la distribution des charges	12
4.3.5 Module de transfert des résultats vers PINCHLENI.....	12
4.4 Tâche□: stabilisation de PINCHLENI	12
4.4.1 Inventaires des erreurs connues et définition d'un plan d'action.....	12
4.4.2 Programmation□adaptation des routines de calculs.....	13
4.4.3 Programmation□adaptation de l'interface.....	14
4.5 Didacticiel	16
5 Travaux futurs et perspectives	16
6 Conclusions.....	17
7 Annexes	17

1 Motivation / Situation

Le logiciel PINCHLENI a été développé par le LENI (EPFL) comme outil de calcul de l'intégration énergétique des procédés industriels. Ce logiciel a été développé avec l'aide de l'OFEN à des fins principalement didactiques. Il présente de nombreux avantages permettant de mettre en évidence les opportunités d'économies d'énergie dans l'industrie principalement par ses aspects interactifs et graphiques. Après une tentative de commercialisation de ce logiciel, force est de constater que les efforts à consentir par le LENI pour maintenir et développer un tel logiciel en tant que produit commercial dans un environnement compétitif et en constante évolution ne pouvaient être réalisés par le LENI et ne relevaient pas de ses missions. Par contre l'analyse du marché potentiel montre que le principal intérêt se trouve dans la combinaison de la formation et de l'utilisation du logiciel.

Face à ce constat, le LENI a désiré avec l'accord de l'OFEN de rendre ce logiciel accessible au plus grand nombre en l'offrant sous forme de téléchargement gratuit sur son site internet. En échange de cette licence gratuite, le LENI constituera une base de données d'ingénieurs actifs dans le domaine de l'intégration énergétique des procédés industriels qui pourra ensuite être utilisée pour la promotion de ces méthodes par la diffusion d'études de cas et la création d'un forum de discussion. Cette approche sera dans le futur intégrée dans un concept de formation continue.

D'autre part, le LENI participe depuis deux ans au consortium d'exploitation et de développement de la plateforme EXSYS¹: une plateforme logicielle constituée d'un serveur web mettant en oeuvre un système expert de sélection optimale des technologies énergétiques pour l'industrie des procédés ainsi qu'un système de base de données des technologies de conversion de l'énergie. Les fonctionnalités du logiciel PINCHLENI et de la plateforme EXSYS étant complémentaires, le LENI a souhaité développer par ce projet une interface permettant aux utilisateurs de PINCHLENI d'accéder automatiquement aux fonctionnalités d'intégration des technologies énergétiques. La plateforme logicielle proposée permettra d'identifier les économies d'énergie possible dans les procédés, de calculer l'intégration optimale des technologies telles que les différentes technologies de cogénération, la production combinées chaleur force dans les réseaux vapeurs, les systèmes de réfrigération, ... et permettra de résoudre des problèmes complexes tels que la résolution de l'intégration des sites industriels.

2 Objectifs du projet

Dans ce contexte, les objectifs du projet ont été

- 1) de fiabiliser le logiciel PINCHLENI afin de corriger les principaux bugs connus du logiciel et d'en améliorer son caractère didactique et sa convivialité.
- 2) De développer un système protégé de distribution du logiciel par la mise en place d'une plateforme logicielle sur le serveur internet du LENI,. Ce système comprend une base de

¹ Le projet EXSYS (contrat n°JOE3-CT97-0070) est un projet partiellement financé par les communautés européennes. Le coordinateur du projet était Air Liquide, les partenaires étaient University of Manchester Institute for Science and Technology (UK), SOFERSID (F), TNO-MEP (NL), David Reay consultants (UK), University of Liège (B), University of Patras (GR), Institute Superior Technico (P), Elf Aquitaine (F), Stichting Technisch Centrum voor de Keramische Industrie (NL). Depuis le 01/02/2001, le projet est entré dans sa phase exploitation. Dans le cadre de la valorisation des résultats de la recherche l'Université de Liège a signé un accord de collaboration avec le LENI pour le développement futur de la plateforme.

- données des utilisateurs, un système de téléchargement automatique, des questions fréquentes, un système de notification des erreurs.
- 3) De développer une interface d'échange d'informations entre le logiciel PINCHLENI et la plateforme EXSYS en vue de valoriser les synergies entre les deux logiciels.
 - 4) De développer un didacticiel comprenant le manuel d'utilisation en ligne, un ensemble de documents de référence pour le support théorique et un tutorial interactif permettant l'apprentissage du logiciel par la résolution d'un exemple.

3 Description du travail réalisé

Afin de réaliser ces objectifs, nous avons procédé de la manière suivante. Dans un premier temps, nous avons appliqué les logiciels PINCHLENI et EXSYS à un ensemble de cas tests. Les logiciels ont été appliqués à la fois par des chercheurs confirmés et par des étudiants inexpérimentés et ce pour différents OS à base MICROSOFT. Bien la plateforme de base choisie pour les développements dans ce projet soit la plateforme WINDOWS, les tests ont dû être sur différents OS: NT4, Windows 98, Windows ME, Windows XP et Windows 2000, en raison de la grande disparité et du peu de cohérence entre ces systèmes aujourd'hui. Ces tests ont permis d'identifier les principales erreurs du logiciel et de définir un plan d'actions au niveau des corrections.

Afin de faciliter le travail de maintenance futur de la plateforme logicielle un système de gestion des erreurs comprenant une base de données partagée via un serveur web a été développé.

Le travail de correction a ensuite porté sur différents aspects: la mise à jour des méthodes de calcul afin de permettre une meilleure cohérence avec la théorie du pincement, la correction des erreurs et l'amélioration de l'interface utilisateur.

Les tests et les développements fondamentaux ont été réalisés par le LENI avec l'aide du Dr. Pierre Krummenacher du Bureau Planair. Les développement du logiciel et interface et convivialité ont été réalisés en sous-traitance par Dr. Alex Molyneaux (OFTTECH s.a.).

Parallèlement à la tâche de test et de «debugging», le système de distribution en ligne a été développé. Il comprend une base de données d'utilisateurs permettant l'inscription en ligne et l'enregistrement des nouveaux utilisateurs et le téléchargement du logiciel. Le développement d'un système de questions fréquentes et d'information des erreurs.

Nous avons ensuite étudié et développé les modules de communication entre le logiciel PINCHLENI et la plateforme EXSYS avec pour objectif d'exploiter au mieux les synergies entre les deux systèmes.

Les logiciels ont ensuite été appliqués pour résoudre un exemple type qui a servi de référence pour le développement du didacticiel.

Celui-ci comprend trois parties:

- a) le manuel d'utilisation en ligne développé au départ du manuel des utilisateurs de PINCHLENI. Celui-ci a été enrichi de liens hypertextes pointant vers les deux autres composants du didacticiel ainsi que vers le système de questions fréquentes qui offre ainsi un accès vers un moteur de recherche
- b) un ensemble de documents de référence (Notes de cours du Dr François Marechal, chargé de cours à l'EPFL) qui décrivent les fondements théoriques de la théorie du pincement tels qu'appliqués dans la plateforme logicielle développée
- c) un tutorial en ligne permettant l'apprentissage de l'utilisation du logiciel PINCHLENI et de la plateforme EXSYS. Ce tutorial se présente sous la forme de pages hypertexte décrivant la résolution d'un exemple et dont chaque page correspond à la résolution d'une étape et la position du problème de l'étape

suivante. Le tutorial est enrichi de liens hypertexte pointant vers le manuel d'utilisation, vers les documents de référence ou vers des explications supplémentaires.

4 Principaux résultats obtenus

4.1 Plateforme de distribution du logiciel PINCHLENI

La plateforme de distribution du logiciel PINCHLENI est un système permettant le téléchargement du logiciel, l'accès aux questions fréquentes, au didacticiel d'apprentissage du logiciel ainsi qu'aux informations concernant le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les procédés industriels. Le développement de ce système s'inscrit dans la perspective poursuivie par le LENI (ISE –STI –EPFL) de mettre à disposition de l'industrie les outils développés dans le cadre de ses activités de recherche et développement dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie. Les développements réalisés sont génériques et pourront être utilisés pour le téléchargement dans le futur d'autres logiciels développés par le LENI.

Ce système a été développé sous LINUX et se base sur un serveur web APACHE. Les outils de développements sont PHP et MYSQL, logiciels gratuits qui sont la référence en matière de développement de site web.

Le système est accessible sur le site web du leni à l'adresse <http://leniwww.epfl.ch>. Il comporte les éléments suivants. Chacun d'eux comprend un ensemble de bases de données relationnelles et l'interface de consultation, de modification, de recherche et de maintenance par l'utilisation d'un serveur web. Nous présentons en annexe 2 les pages importantes du système de distribution du logiciel.

Table 1 □ Principaux éléments de la plateforme de distribution du logiciel PINCHLENI

Utilisateurs	Base de données comprenant les principales informations concernant les personnes ayant téléchargé le logiciel PINCHLENI. Cette base de données est une base de données interne au LENI dont les informations ne sont pas communiquées et dont l'usage est limité à la diffusion d'informations relatives aux logiciels développés par le LENI et à ses activités de recherche dans le domaine. Le LENI se réserve le droit d'offrir à certains de ces utilisateurs la possibilité de se faire connaître sur le site dans le cadre d'actions de sponsoring de ses activités de R&D.
Erreurs	Base de données des erreurs connues du logiciel. Cette base de données peut être utilisée par les utilisateurs pour signaler des erreurs relatives au logiciel. Son accès est cependant restreint aux responsables du LENI pour ce qui concerne la consultation, les modifications et la liste d'actions. Cette base de données sera utilisée par les chercheurs du LENI et par les développeurs pour décider de la liste d'actions à entreprendre afin d'améliorer les logiciels proposés.
FAQ	Base de données des questions fréquentes concernant le logiciel. Les questions fréquentes y sont présentées par thème et développées sous forme de textes courts et faisant référence le cas échéant à des textes plus longs, aux manuels ou à d'autres documents idoines. Le système de questions fréquentes comprend un moteur de recherche qu'un ensemble de bases de données annexes permettant l'ajout automatique de thèmes, de logiciels concernés,....

Tutorial	Le tutorial se présente sous la forme d'un didacticiel comprenant un ensemble de pages web organisées pour permettre l'apprentissage du logiciel. Un exemple y est résolu étape par étape, chaque étape se terminant par la définition de l'étape suivante que l'utilisateur a le loisir d'exécuter lui-même les actions avec le logiciel avant de consulter à la page suivante du tutorial l'explication de ces actions. Le tutorial comprend de manière explicite quelle commande doit être exécutée, à quel moment ainsi qu'un ensemble de copies d'écran illustrant le résultat de la commande. Ce didacticiel est donc une aide précieuse pour la prise en main du logiciel.
Manuel d'utilisation	Le manuel d'utilisation est la version en ligne du manuel des utilisateurs qui peut également être téléchargé en tant que document pdf sur le site web. Le manuel a été complété et enrichi de liens hypertextes vers les documents de référence ou vers le tutorial. Le système de questions fréquentes pointe vers les chapitres du manuel des utilisateurs qui bénéficie ainsi d'un moteur de recherche.
Notions théoriques d'intégration énergétique	Sur le site de PINCHLENI, il est également possible d'accéder à un ensemble de documents de référence constituant une partie des notes du cours d'énergétique avancée (Dr. François Marechal , chargé de cours, LENI – ISE – STI – EPFL) et décrivant les principales notions théoriques des méthodes mises en oeuvre dans cette plateforme logicielle.
News	Le système comprend une base de données de news qui seront affichées à l'accueil sur le site PINCHLENI. Ces news comprendront les principales nouvelles concernant l'utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie liées aux activités du LENI.
Administration	Un système d'administration du site web et des bases de données a été développé. Il permet la maintenance du contenu du site et des différentes bases de données et permet également une extension facile à d'autres logiciels qui pourront être téléchargés par le même système. Le système d'administration permet également une gestion aisée de la base de données des utilisateurs.

4.2 Principe de téléchargement du logiciel.

Le téléchargement du logiciel PINCHLENI n'est possible que pour les utilisateurs enregistrés. L'enregistrement est gratuit et implique l'acceptation des conditions de téléchargement (annexe 1). L'inscription comprend l'accès au logiciel PINCHLENI et un code d'accès à la plateforme EXSYS développée et hébergée par le Laboratoire d'Analyse et de Synthèse des Systèmes Chimiques (LASSC) de l'Université de Liège. L'acceptation par l'utilisateur des conditions produit un E-mail qui est envoyé aux administrateurs du site PINCHLENI. La procédure d'enregistrement se poursuit par la confirmation du mot de passe par l'administrateur du site qui produit l'envoi par E-mail de l'adresse de téléchargement du logiciel dont l'accès est protégé par mot de passe. L'acceptation étant manuelle, il peut dès lors y avoir un certain délai entre la demande d'enregistrement et son acceptation.

Tout accès aux documents et autres systèmes concernant le logiciel PINCHLENI requiert ensuite l'utilisation du mot de passe utilisateur.

La base de données des utilisateurs est gérée de manière confidentielle. Le LENI se réserve explicitement le droit d'utiliser ces informations pour informer les utilisateurs de ses activités de recherche ainsi que de la mise à disposition de nouvelles versions ou de nouveaux logiciels.

4.3 Accès au logiciel EXSYS

Le logiciel PINCHLENI est un logiciel dont la vocation est principalement didactique ce qui justifie sa grande convivialité au niveau de l'utilisation. Certaines fonctionnalités ne sont cependant pas disponibles. On citera notamment l'intégration des utilitaires dont la combustion, les systèmes de cogénération, de pompe à chaleur et de réfrigération qui ne pouvaient être introduits qu'avec des débits fixés. De plus, par sa conception, le logiciel PINCHLENI ne permet de résoudre des problèmes de grandes tailles concernant notamment l'intégration des sites industriels. Plutôt que de développer ses fonctionnalités, le LENI a choisi d'intégrer le logiciel PINCHLENI à la plateforme EXSYS. Le LENI participe donc en tant que partenaire au développement de cette plateforme informatique dont l'objectif est la promotion de l'utilisation et de la transformation rationnelle de l'énergie dans l'industrie. Cette plateforme appelée EXSYS a été développée dans le cadre de projets Européens par le LASSC de l'Université de Liège.

Le logiciel EXSYS permet notamment de réaliser le calcul de l'intégration des technologies de conversion de l'énergie couramment appelés flux utilitaires. Il possède un système expert permettant de réaliser l'analyse des besoins énergétiques d'un procédé défini par les flux chauds et froids et de déterminer pour ce système les meilleurs choix pour le calcul de l'intégration des systèmes de conversions de l'énergie. Le logiciel EXSYS comprend l'accès à un ensemble de bases de données de technologies de conversion de l'énergie permettant de choisir « sur le marché » les technologies les plus adéquates pour satisfaire à moindres coûts les besoins du procédé. Le système expert combine l'utilisation de règles heuristiques, les bases de données de technologies et des outils de modélisation et d'optimisation permettant de calculer la meilleure intégration possible. La plateforme EXSYS est particulièrement bien adaptée pour résoudre les problèmes d'intégration des systèmes tels que les réseaux vapeurs, les systèmes de cogénération, ...

A l'annexe 3, nous présentons une étude réalisée dans le cadre de ce projet en collaboration avec l'Université de Liège (Marechal and Kalitventzoff, 2002) et portant sur l'utilisation du logiciel EXSYS pour le calcul de l'intégration énergétique d'un site de production industrielle. Cette application illustre l'intérêt de ce logiciel et démontre les potentiels d'économie d'énergie important (30%) qui peuvent être obtenus lorsqu'on adopte l'approche holistique pour étudier l'intégration énergétique du site de production. Cette étude démontre également l'importance des techniques de cogénération comme outil de transformation rationnelle de l'énergie. Un aspect intéressant mis en évidence par cette étude est la mise en évidence de la difficulté de traiter des problèmes multi-période et l'impact que cela peut avoir sur l'intérêt de l'intégration de systèmes tels que les pompes à chaleur. Cette publication a été présentée à la conférence PRES02 (Prague, août 2002) et est acceptée pour publication dans Applied Thermal Engineering.

Les modules d'intégration et de communication développés dans le cadre de ce projet sont les suivants :

- 1) module de lecture des données PINCHLENI dans la base de donnée utilisée par les logiciels de calcul de la plateforme EXSYS
- 2) module de téléchargement des données PINCHLENI sur le site EXSYS
- 3) module de calcul de l'intégration des utilitaires de PINCHLENI
- 4) module de calcul de la distribution des charges au départ des utilitaires PINCHLENI.

- 5) module de transfert de la nouvelle liste des flux (comprenant les utilitaires) pour le logiciel PINCHLENI. Cette dernière étape permet de réaliser la conception du réseau d'échangeurs par les outils du logiciel PINCHLENI, en considérant les débits des flux utilitaires calculés pour l'intégration optimale.

4.3.1 Module de lecture des données PINCHLENI

Ce module permet de charger les données des flux définis dans le logiciel PINCHLENI dans la base de données de définition des problèmes utilisée par les logiciels de calcul de la plateforme EXSYS. Le module développé tient compte des différentes possibilités de définition des flux du logiciel PINCHLENI (i.e. flux définis par segment (mot clé «**SAME**»), flux thermodynamiques, flux changeant de phase,...).

Le nom du fichier de données de PINCHLENI est utilisé pour définir une unité dont le nom sera défini par les 8 premières lettres du nom du fichier. Dans la plateforme EXSYS, la notion d'unités est très importante car elle permet de définir un système complexe par l'intégration d'un ensemble de sous-systèmes dont l'unité de base est appelée «**Unité**». Chacun de ces sous-systèmes pourra être défini par un fichier de données PINCHLENI. Le logiciel PINCHLENI permettra donc de définir et de réaliser l'analyse préliminaire des sous-systèmes d'un procédé industriel pour ensuite traiter l'intégration du système complet par les logiciels de calcul de la plateforme EXSYS. Dans la base de données de la plateforme EXSYS, chaque transformation thermique (flux chaud ou froid) est définie par deux états thermodynamiques (origine et destination). Chacun de ces états porte un nom qui est généré automatiquement en prenant les 5 premières lettres du nom de fichier PINCHLENI auxquelles on ajoute deux lettres correspondant au numéro du flux dans le fichier. Le nom de l'état destination est obtenu en ajoutant un suffixe «**_D**» au nom de l'état origine. Le nombre de flux pouvant être traité dans la plateforme EXSYS est limité à trente (30) par fichier PINCHLENI. Le nombre maximum de flux pour la plateforme EXSYS est dans l'état actuel de 800. Il convient de remarquer que dans le cas de problèmes, la méthode de définition par sous-systèmes imbriqués telle que appliquée dans la plateforme EXSYS devient très utile.

4.3.1.1 Besoins de procédé

Les unités des flux définissant les besoins du procédé, à savoir ceux qui ne sont pas des utilitaires (mot clé 'UTIL' de PINCHLENI) sont ajoutées dans la liste d'unités '(REQ)' utilisée pour répertorier les sous-systèmes qui définissent les besoins du procédé dans la plateforme EXSYS.

4.3.1.2 Flux utilitaires

Les flux utilitaires sont importés dans le logiciel EXSYS comme des flux dont le débit est inconnu. Celui-ci doit être déterminé pour satisfaire les besoins d'énergie du procédé à moindres coûts. Les flux utilitaires sont ajoutés dans une unité de type SYNUTI (format d'unité définissant les transformations à débit inconnu dans le logiciel EXSYS). Le nom de cette unité est constitué en ajoutant le suffixe '_U' aux 5 premières lettres du nom du fichier PINCHLENI. L'unité est ajoutée à la liste définissant le système d'utilitaires PINCHLENI appelée '(MYUTIL)', celle-ci étant ajoutée à la liste des unités du problème à résoudre. Dans le logiciel EXSYS, les flux utilitaires ne sont pas considérés pour le calcul du minimum d'énergie requise. Ils seront uniquement utilisés pour le calcul de l'intégration des utilitaires (voir plus loin). Lors de l'importation des flux utilitaires, il est nécessaire d'associer un coût à chaque flux utilitaire. Le prix de revient des utilitaires chauds et froids sera déterminé au départ de la valeur des prix de l'énergie par défaut définis dans la plateforme EXSYS (UNIT COST HOTUT et UNIT COST COLDUT) et de la quantité d'énergie du flux utilitaire correspondant.

4.3.1.3 DTmin

Dans le logiciel EXSYS, la définition de la différence de température minimum d'approche diffère de celle utilisée dans PINCHLENI. Dans le logiciel EXSYS, il est en effet possible d'associer une contribution à la différence de température d'approche à chaque flux sous la forme d'un « $DT_{min}/2$ ». Pour un fluide donné, cette valeur est inversement proportionnelle à valeur du coefficient de transfert de film. Rappelons que le coefficient de transfert de film est utilisé pour estimer la surface d'échange totale et calculer le compromis énergie-capital pour l'optimisation de la valeur du DTmin. L'utilisation du concept de $DT_{min}/2$ permet de travailler dans un grand domaine de température pour des systèmes réalisant à la fois la combustion (haute température et grands $DT_{min}/2$) et la réfrigération (petits $DT_{min}/2$). Afin de transférer la valeur du DTmin calculée par PINCHLENI, nous avons ajouté la possibilité d'ajouter une ligne en entête du fichier PINCHLENI permettant de lire la valeur de DTmin par le mot clé DTMIN=. Chaque flux PINCHLENI sera ensuite ajouté dans EXSYS avec une contribution $DT_{min}/2=DTMIN/2$.

Nous avons également montré que la relation qui unit le coefficient de transfert de film et la différence de température $DT_{min}/2$ correspond à la relation suivante \square

$$\frac{DT_{min}/2_i}{DT_{min}/2_{ref}} = \frac{\frac{1}{h_i}}{\frac{1}{h_{ref}}}^b$$

Avec b l'exposant de l'estimation du coût de l'échangeur : $C_{htx} = a * (A)^b$

h_{ref} le coefficient de transfert de film pour le fluide de référence

$DT_{min}/2_{ref}$ la valeur du $DT_{min}/2$ pour le fluide de référence

h_i le coefficient de transfert de film pour le fluide i

$DT_{min}/2_i$ la valeur du $DT_{min}/2$ pour le fluide i

Pour l'approche d'optimisation du DTmin, ce sera alors la valeur du $DT_{min}/2_{ref}$ qui sera optimisée pour représenter au mieux le compromis énergie-investissement estimé.

4.3.1.4 Modèles thermodynamiques

L'ensemble des modèles thermodynamiques utilisés dans PINCHLENI sont également disponibles dans le logiciel EXSYS.

Le logiciel EXSYS utilisant des modèles thermodynamiques différents de ceux utilisés dans le logiciel PINCHLENI, il est possible que les résultats obtenus puissent légèrement différer de ceux produits par le logiciel PINCHLENI. Un effort a cependant été consenti afin de garantir la meilleure compatibilité entre les deux systèmes.

4.3.2 Module de téléchargement des données PINCHLENI

Le logiciel EXSYS est une plateforme opérée par un serveur web. Sur ce serveur, chaque utilisateur dispose d'un espace disque réservé. Sur cet espace disque, l'utilisateur sauve la définition des problèmes qu'il est en train de résoudre. Le système EXSYS enregistre la liste des opérations déjà réalisées et en déduit au départ d'une base de données de connaissances et de

l'analyse des besoins, une liste d'actions à réaliser. Un module de téléchargement des fichiers PINCHLENI a été développé sur ce serveur. Le téléchargement est réalisé sous la forme d'une page web utilisant le principe des formulaires d'acquisition (mot clé HTML FORM). Les données suivantes sont demandées:

- 1) le nom du fichier□ dont les 8 premières lettres seront utilisées pour définir le nom de l'unité importée.
- 2) le contenu du fichier□ celui-ci est obtenu par la commande «**Browse**» qui permet de sélectionner le fichier sur le disque de l'utilisateur. En raison des différents modes d'encodage seuls les fichiers provenant de la version Windows de PINCHLENI pourront être téléchargés.
- 3) une valeur du DTmin qui sera utilisée pour attribuer la valeur du DTmin/2 aux différents flux du fichier de données.

En exemple de formulaire est donné en annexe 4.

A la réception du fichier, le module réalise sur le serveur les opérations suivantes□

- 1) identification de l'utilisateur et du problème en cours□
- 2) conversion du fichier et ajout du mot clé DTMIN= avec la valeur spécifiée par l'utilisateur□
- 3) Importation des données PINCHLENI□ au moyen du module d'importation des données;
- 4) Calcul du minimum d'énergie requise□
- 5) Génération du rapport□
- 6) Constitution de la liste des prochaines étapes□ réaliser;

A l'issue de l'exécution de cette commande, qui peut être répétée pour tous les sous-systèmes définissant le problème, toutes les fonctionnalités de la plateforme EXSYS peuvent être utilisées.

4.3.3 Module de calcul de l'intégration des utilitaires de PINCHLENI

Afin de rester cohérent avec l'utilisation de PINCHLENI, un module permettant de réaliser le calcul de l'intégration optimale de utilitaires au départ des utilitaires spécifiés dans PINCHLENI a été développé. Ce module permet le calcul des débits optimaux à considérer pour satisfaire la demande énergétique du procédé au départ des utilitaires définis dans le logiciel PINCHLENI (mot clé UTIL). Cette approche diffère de l'approche développée jusqu'à présent dans EXSYS puisqu'en principe, le calcul se fait sur base de la sélection optimale des technologies de conversion suivant une procédure établie par le système expert au départ de l'analyse des besoins.

Il convient de remarquer que le calcul des utilitaires par le logiciel EXSYS diffère de celui qui est appliqué dans PINCHLENI, puisqu'il n'y a dans EXSYS ni restriction sur le nombre d'utilitaires leurs niveaux de température.

Dans le logiciel EXSYS, le calcul de l'intégration des utilitaires est réalisé par la résolution d'un programme de programmation linéaire en nombre entiers qui permet de calculer les débits qui minimisent la fonction objectif (dans notre cas, le prix de revient des flux utilitaires). Cette formulation est en partie présentée à l'annexe 3.

Le module développé permet de choisir entre le mode automatique (approche conventionnelle dans la plateforme EXSYS) et le mode utilitaires PINCHLENI développé dans ce projet.

Le tutorial présenté à l'annexe 6 illustre l'application de cet outil.

4.3.4 Module de calcul de la distribution des charges

La distribution des charges est une technique d'optimisation permettant d'identifier pour un ensemble de flux chauds et froids donnés l'ensemble des échanges de chaleurs (connexions entre les flux chauds et les flux froids) et la quantité de chaleur correspondante. Ces valeurs seront ensuite utilisées pour définir le réseau d'échangeurs dans PINCHLENI.

Le module de calcul de la distribution des charges est un outil disponible dans le logiciel EXSYS. Il permet de calculer par un programme d'optimisation linéaire en nombres entiers (MILP) quel flux chaud échangera avec quel flux froid et quelle quantité de chaleur. La fonctionnalité existante dans le logiciel EXSYS, la principale contribution a été de développer l'outil d'interface. Le calcul de distribution des charges permet d'aider à la conception du réseau d'échangeur (mode net de PINCHLENI) en définissant des sets d'échanges possibles. Dans le logiciel EXSYS, ce calcul incorpore également un ensemble de règles heuristiques dont l'objectif est de favoriser l'émergence des meilleures configurations pour le réseau d'échangeurs.

4.3.5 Module de transfert des résultats vers PINCHLENI

Le logiciel EXSYS a pour objectif de caractériser l'ensemble de flux chauds et froids du système en ce compris les flux utilitaires dont le débit sera déterminé afin de minimaliser le prix de revient de l'énergie. A l'issue de ce calcul, nous obtenons une liste des flux qui sera utilisée pour la conception du réseau d'échangeurs. Afin de permettre le calcul du réseau d'échangeurs au départ des résultats du calcul de la distribution des charges, un module d'exportation des flux, y compris les flux utilitaires calculés, a été développé. Cette liste de flux sera utilisée pour réaliser la conception du réseau d'échange dans le mode 'NET' de PINCHLENI. L'ensemble des flux dont le débit est non nul est ainsi sauvé dans le formalisme PINCHLENI. Ce fichier est ensuite envoyé du serveur vers le browser de l'utilisateur. En sauvant cette page comme un fichier texte, on obtient un fichier lisible par PINCHLENI qui peut ensuite être utilisé pour concevoir le réseau d'échangeurs.

4.4 Tâche 2: stabilisation de PINCHLENI

Le logiciel PINCHLENI est un logiciel interactif de calcul de l'intégration énergétique des procédés industriels basé sur la méthode du pincement. Ce logiciel a été développé par le laboratoire d'énergétique industrielle (LENI) de l'EPFL avec l'aide de l'OFEN. Ce logiciel développé initialement à des fins didactiques permet le calcul des courbes composées, l'optimisation de la valeur du DTmin (principale hypothèse d'application de la théorie du pincement) en fonction des critères économiques ainsi que la conception interactive du réseau d'échangeurs. Dans ce projet, notre objectif a été de «stabiliser» le logiciel pour le proposer comme outil de formation et de promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie. Cette tâche vise à corriger les principaux bugs connus afin de rendre l'utilisation de PINCHLENI plus intuitive et efficace. Les critères qui ont été appliqués pour identifier les modifications apportées sont les suivants: offrir une bonne cohérence entre la théorie et sa mise en oeuvre et améliorer la convivialité de l'interface utilisateur en incorporant les réflexes connus du monde WINDOWS.

4.4.1 Inventaires des erreurs connues et définition d'un plan d'action.

Le logiciel a été appliqué pour résoudre des exemples d'application principalement par des ingénieurs et des étudiants n'ayant pas utilisé le logiciel auparavant. Cette phase de test a permis d'identifier les principaux défauts de l'interface ainsi que les problèmes d'installation. Une base de données accessible sur le site du logiciel PINCHLENI a été utilisée pour recenser les bugs connus et permettre aux futurs utilisateurs d'informer les développeurs des bugs et problèmes éventuels. Cette base de données permet aux développeurs d'être informé des bugs, de

coordonner leurs actions («qui fait quoi comment») d'établir un niveau de priorité aux corrections, de déterminer une liste d'actions et de décrire les solutions proposées. Un exemple de formulaire d'acquisition des bugs est donné en annexe 7 ainsi que le formulaire d'acquisition plus complet accessible par les développeurs.

La base de données des erreurs n'est pas accessible aux utilisateurs seuls les administrateurs du site PINCHLENI auront accès a ces informations.

4.4.2 Programmation et adaptation des routines de calculs

Les routines de calculs ont été adaptées à différents niveaux

4.4.2.1 traitement des utilitaires

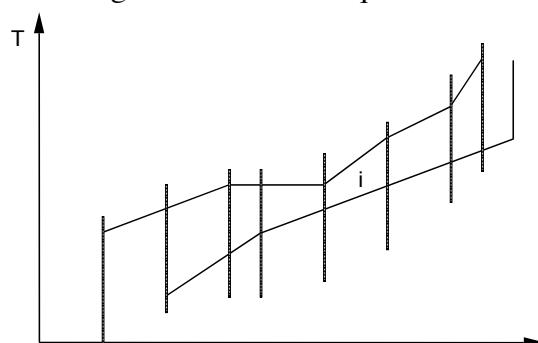
La nouvelle version permet de travailler avec des utilitaires par défaut défini par le logiciel ceci permet d'appliquer le logiciel aux cas simples d'application de la théorie sans avoir à définir de flux utilitaires. Cette approche permet donc une approche combinée dans laquelle les utilitaires peuvent soit être définis par l'utilisateur soit définis par défaut par le logiciel. La gestion des utilitaires étant limitée en raison des concepts appliqués pour l'optimisation du DTmin, le traitement des utilitaires multiples ou des utilitaires ayant des profils de température spéciaux n'a pas été considéré directement au sein du logiciel PINCHLENI. En effet, les développements d'interfaçage avec le logiciel EXSYS permettent à présent de résoudre ce problème de manière très efficace par l'application des techniques de la recherche opérationnelle.

4.4.2.2 traitement de la condensation et de l'évaporation

Dans la nouvelle version de PINCHLENI, il est possible de définir des flux qui changent de phase à température constante sans devoir spécifier une petite différence de températures. Cette modification consiste à indiquer à l'aide d'un mot clé ('evap' ou 'cond') le caractère froid ou chaud du changement de phase dans le champ Tin. Dans ce cas, le champ «Tp» du flux devient la chaleur spécifique du fluide qui change de phase.

4.4.2.3 Estimation des surfaces d'échange et de l'investissement

Une nouvelle méthode d'estimation de l'investissement qui est utilisée dans PINCHLENI pour optimiser la valeur du DTmin a été implémentée. Cette approche repose sur le principe suivant Le calcul de la surface totale d'échange est inchangé il correspond au calcul par zones d'échange verticaux telles qu'identifiées à la figure suivante



La surface totale est ensuite calculée par

$$\sum_{i=1}^{nbT_{inter}} A_i = \sum_{i=1}^{nbT_{inter}} \frac{\dot{Q}_i}{U_i * (\Delta T_{ln})_i} = \sum_{i=1}^{nbT_{inter}} \sum_{j=1}^{nbstreams_i} \frac{\dot{Q}_i}{h_{j,i} * (\Delta T_{ln})_i}$$

avec nbT_{inter} le nombre d'intervalles de températures verticaux identifiés,

$h_{j,i}$ le coefficient de transfert de film du flux j présent dans la zone d'échange verticale i

\dot{Q}_i la quantité de chaleur transférée dans la zone échange verticale i

$(\bar{T}_{\ln})_i$ la moyenne logarithmique des températures dans l'échange vertical considéré

$nbstreams_i$ le nombre de flux présents dans l'échange vertical i.

En changeant la valeur du DTmin, on déplace horizontalement une courbe par rapport à l'autre, ce qui conduit à une nouvelle valeur de la charge \dot{Q}_i et de la moyenne des températures $(\bar{T}_{\ln})_i$.

L'investissement est ensuite estimé en considérant le calcul du nombre minimum d'échangeurs calculé par la théorie des graphes et qui est calculé par

$$U_{\min,mer} = (nbstreams \square 1) + (nbstreams_{pinch} \square 1)$$

ou $nbstreams$ est le nombre de flux total du système y compris les flux utilitaires

$nbstreams_{pinch}$ le nombre flux traversant le point de pincement

La surface d'échange totale est ensuite répartie de manière égale sur le nombre d'échangeurs

$$U_{\min,mer} \text{ par}$$

$$A = \frac{\square A_i}{U_{\min,mer}} = \frac{\square i \square nbT_{inter} nbstreams_i}{(\square nbstreams \square 1) + (\square nbstreams_{pinch} \square 1)} \frac{\dot{Q}_i}{h_{j,i} * (\bar{T}_{\ln})_i}$$

et l'investissement est ensuite estimé en faisant l'hypothèse que le réseau sera constitué du nombre minimum d'échangeurs ($U_{\min,mer}$) et de taille identique, soit

$$U_{\min,mer} \square I(A_i(\bar{T}_{\min})) \square U_{\min,mer} * \frac{\square a + b}{\square U_{\min,mer}} \frac{\square c}{\square}$$

Ceci permet de calculer des courbes d'évolution du coût total présentant des cassures qui correspondent à une modification de la position du pincement.

Ces points sont particulièrement importants parce qu'un changement de pincement correspond à un changement de la liste des flux présents au pincement et donc à une modification des flux qui seront considérés dans la procédure de conception du réseau d'échangeurs.

Ces développements ainsi que la définition de la liste des modifications ont été réalisés avec l'aide du Dr Pierre Krummenacher (PLANAIR s.a.).

4.4.3 Programmation et adaptation de l'interface.

L'utilisation de PINCHLENI par les étudiants dans le cadre des cours donnés à l'EPFL, ainsi que la résolution de plusieurs exemples d'application par de nouveaux utilisateurs a permis d'améliorer l'interface du logiciel.

La nouvelle version de PINCHLENI présente les nouvelles fonctionnalités suivantes

- Procédure d'installation compatible avec les systèmes WINDOWS 2000, XP, NT4,98 et Me.
- Nouvelle interface d'édition des flux plus conviviale et utilisation des raccourcis claviers, valeurs par défaut,

- Nouvelle interface d'accueil pour un nouveau problème□on démarre par l'édition des flux□
- Nouvelle interface pour l'édition du réseau d'échangeurs□utilisation du bouton de droite de la souris, utilisation de la touche «Delete»□
- Messages d'erreur cohérents et vérification de consistance des champs d'acquisition.

Cette tâche a été réalisée par le Dr. Alex Molyneaux (OFTTECH s.a.) sous-traitant qui a contribué au développement de PINCHLENI sous WINDOWS.

Les logiciels de programmation utilisés pour ces développements sont VISUAL BASIC 6 pour les travaux d'interface et DELPHI professionnel pour ce qui concerne la programmation en PASCAL.

L'ensemble de ces développements ont été appliqués à différents cas industriels□principalement dans le domaine des piles à combustible a démontré l'intérêt de ce logiciel. Il convient de remarquer que l'utilisation combinée de PINCHLENI et des concepts de EXSYS ont été nécessaires pour résoudre les problèmes concernant l'intégration de systèmes de cogénération.

4.5 Didacticiel

Un didacticiel devant permettre l'auto-apprentissage du logiciel a été développé et est disponible en ligne sur le site PINCHLENI. Ce didacticiel concerne la résolution dans un exemple décrit en détail. Il se présente sous la forme d'un ensemble de pages hypertextes structurées de manière à ce que chaque page explique la réalisation d'une action et pose le problème de l'étape suivante. Ce didacticiel est enrichi de liens hypertextes et de copies d'écrans qui illustrent l'utilisation des logiciels.

L'ensemble didacticiel est présenté aux annexes 5 (tutorial PINCHLENI) et 6 (tutorial EXSYS)

Afin de faciliter la mise à jour et l'enrichissement des documents à disposition des utilisateurs dans le cadre de l'apprentissage des logiciels proposés, le manuel d'utilisation de PINCHLENI est à présent disponible en ligne. Il a été enrichi d'un ensemble de liens hypertexte permettant des références croisées avec les questions fréquentes et/ou le tutorial.

Grâce à son moteur de recherche, le système de questions fréquentes permettra aux utilisateurs de trouver réponse aux principales interrogations qui se posent lors de l'utilisation du logiciel. Ce système est destiné à s'étoffer dans l'avenir en fonction des contributions des utilisateurs.

Afin d'enrichir l'utilisation du logiciel des aspects théoriques plus fondamentaux, un ensemble de documents décrivant les fondements théoriques des méthodes d'intégration énergétique est également téléchargeables sur le site PINCHLENI.

Afin de faciliter l'accès au plus grand nombre l'ensemble de ces documents a été développé en anglais.

5 Travaux futurs et perspectives

L'ensemble des développements réalisés dans le cadre de ce projet avaient pour objectif le développement d'un système flexible devant permettre une maintenance aisée et une mise à jour régulière de la plateforme logicielle proposée. Ce développement s'inscrit dans la perspective de la promotion de l'utilisation des techniques d'intégration énergétique et de transformation rationnelle de l'énergie dans les procédés industriels.

Cette plateforme est utilisée dans le cadre de l'enseignement des méthodes d'intégration énergétique et d'énergétique avancée dispensé aux étudiants de la section génie mécanique de l'EPFL (20 étudiants par année) ainsi qu'aux étudiants du cours postgrade en énergie de l'EPFL (30 étudiants en 2003). Par leur participation au cours, ces étudiants deviendront utilisateurs de PINCHLENI.

Bien qu'étant déjà en activité (accès via le site web du LENI (<http://leniwww.epfl.ch>)), le site PINCHLENI sera promu par l'organisation d'un cours formation continue qui sera proposé au premier semestre 2003.

Pour ce qui concerne les développements futurs, il est clair que le logiciel reste pour l'instant limité et que des améliorations restent à apporter. Outre l'amélioration continue de la plateforme au niveau de sa convivialité, deux axes de développement devront être plus particulièrement étudiés la simulation et l'optimisation du réseau d'échangeurs (incluant

une approche multi-objectifs) et le traitement des procédés discontinus. Ces deux axes de développement feront l'objet de demandes ultérieures.

Un système de sponsoring, en collaboration avec la plateforme EXSYS, pourra être envisagé afin de financer la maintenance et les efforts de développement de la convivialité du logiciel.

De plus des liens automatiques avec des logiciels de modélisation de procédés industriels devraient également être développés. Dans cette perspective, une approche permettant l'utilisation des techniques de l'intégration en tant qu'outil de modélisation des réseaux d'échangeurs dans la phase de conception de procédés mériterait d'être étudiée.

6 Conclusions

Les développements réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de développer un système de promotion et de diffusion des outils d'intégration énergétique. La combinaison des outils PINCHLENI développés à l'EPFL et la participation du LENI au développement de la plateforme EXSYS (développée par l'Université de Liège dans le cadre d'un projet Européen) ainsi que l'intégration de ces deux outils permet de mettre à disposition des industriels Suisse une plateforme logicielle performante d'aide à la décision basée sur l'application des techniques du pincement pour promouvoir une utilisation plus rationnelle de l'énergie dans les procédés industriels.

Le développement d'un site web permet aujourd'hui le téléchargement gratuit du logiciel moyennant l'acceptation des conditions générales d'utilisation et l'inscription à une base de données. Cette base de données permettra à l'avenir de tenir les utilisateurs du logiciel PINCHLENI-EXSYS informés des nouveautés et des activités dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que la mise à disposition de résultats de projets de démonstration. La plateforme développée dans le cadre de ce projet comprend une base de données des utilisateurs, un système de téléchargement du logiciel, un système de questions fréquentes ainsi qu'un système intégré de gestion des erreurs (bugs logiciels) pour une gestion plus efficace de la maintenance des logiciels proposés.

Au niveau de la plateforme de calcul, les développements ont concerné la fiabilisation du logiciel PINCHLENI en version WINDOWS et le développement d'une interface avec le logiciel EXSYS. Ce développement permet de traiter de manière efficace les problèmes d'intégration des utilitaires comprenant la combustion, la cogénération, les pompes à chaleurs, les cycles de Rankine (réseau vapeur et cycles à fluide organique) ainsi que les cycles de réfrigération.

Un didacticiel d'apprentissage de cette plateforme a été développé. Ce didacticiel se compose d'un ensemble de documents hypertextes destinés à favoriser l'auto apprentissage de l'utilisation du logiciel. Ce didacticiel s'appuie sur un manuel des utilisateurs en ligne et sur un ensemble de documents présentant les fondements théoriques également accessibles en ligne sur le site de PINCHLENI.

7 Annexes

Annexe 1 Conditions générales de téléchargement de PINCHLENI

Annexe 2 Plateforme de téléchargement du logiciel PINCHLENI et système de questions fréquentes connect to the [web site](#)

Annexe 3 «Targeting the optimal integration of utility for site scale applications», François Marechal and Boris Kalitventzoff, présenté en séance plénière à PRES2002 Fifth conference «Process integration, modelling and Optimisation for energy saving and pollution reduction» dans le cadre de CHISA 2002 15th International Congress of Chemical and Process Engineering et accepté pour publication dans Applied Thermal Engineering.

Annexe 4 page de téléchargement des fichiers PINCHLENI pour le logiciel EXSYS connect to the [web site](#)

Annexe 5 Tutorial d'application PINCHLENI connect to the [web site](#)

Annexe 6 Tutorial d'application PINCHLENI-EXSYS connect to the [web site](#)

Annexe 7 Formulaire de description des erreurs et formulaire d'éditions pour les développeurs.

Annexe 1 Conditions générales de téléchargement de PINCHLENI



Welcome in the PINCHLENI - EXSYS web site

PINCHLENI is a process integration software developed by the [Laboratory of industrial Energy Systems](#) (LENI) of the [Swiss Federal Institute of Technology \(Lausanne\)](#) with the help of the [Swiss Federal Office of Energy](#).

[EXSYS](#) is a web based computer plateform for the optimal insertion of energy saving technologies developed by the [LASSC](#) at the [University of Liege \(B\)](#) in a project partially funded by the European Commission (FP5)

To access the PINCHLENI - EXSYS Web site you need first to login :

login

password

If you are New, please register first

[Register Now !](#)

©2002 EPFL - [Contact](#)



Inscription

you must read this document carefully and agree the following conditions before registration.

PINCHLENI Version 3.0 LICENCE AGREEMENT

This is a legal agreement between you the end user and the Laboratoire d'Energétique Industrielle of the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ('LENI-EPFL')

PINCHLENI has been developed by LENI with the help of the Swiss Federal Office of Energy.

GRANT OF LICENCE. This licence agreement ('LICENCE') permits you to use one copy the PINCHLENI software acquired with this LICENCE ('SOFTWARE'). Multiple licence requires multi registrations.

COPYRIGHT. The SOFTWARE and the accompanying written materials are owned by LENI-EPFL and are protected by copyright laws, international treaty provisions, and all other applicable national laws. Unauthorized copying of the SOFTWARE including SOFTWARE which has been modified, or of the accompanying written materials is expressly forbidden.

OTHER RESTRICTIONST. You may not sell, rent or leave the SOFTWARE to a third party. You may not reverse engineer, decompile or disassemble or modify the SOFTWARE.

COPYRIGHT. NO WARRANTIES. LENI-EPFL disclaims all warranties, either express or implied, including but not limited to implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, with respect to the SOFTWARE and the accompanying written materials. Further, LENI-EPFL makes no warranty regarding the use of the PC Windows version of the SOFTWARE on a platform different from which running on 486 processor (or later) with a math coprocessor, DOS and Windows 95, 98, NT and 2000, and at least 4 MB of RAM and 9 MB of hard disk space. LENI-EPFL makes no warranty regarding the use of Macintosh version 2.0 of the SOFTWARE on a platform different from which running with a 68030, 68040, PPC, G3, G4 processor and with MacOS 7 up to 9 and OSX under classic environment.

NO LIABILITY FOR CONSEQUENTIAL DAMAGES. LENI-EPFL shall not be liable for any other damages whatsoever (including, without limitation, damages for loss of business profits, business interruption, loss of business information, or other pecuniary loss) arising out of the use of or inability to use this SOFTWARE even if LENI-EPFL has been advised of the possibility of such damages.

PRICE. PINCHLENI Version 3.0 is available through electronic free download after accepting this registration form.

PUBLICATION. LENI requires the usage of PINCHLENI software to be reported in scientific publications.

SUPPORT. LENI-EPFL will not provide any dedicated support to the software. Only electronic support will be provided through our web site <http://leniwww.epfl.ch>

MAILING LIST : by accepting this agreement, you will automatically be registered to the mailing list of the PINCHLENI users.

LENI , EPFL - STI - ISE, CH - 1015 Lausanne. Fax + 41 21 69 335 02

I agree I disagree



STI Engineering Faculty
ÉCOLE POLYTECHNIQUE LENI - Laboratoire d'énergétique industrielle - Laboratory of Industrial Energy Sys!



English only

[PINCHLENI - EXSYS Software](#)NEWS
leni

Inscription -- Fields marked must be completed *

Company *	LENI
Lastname *	Marechal
Firstname *	Francois
E-mail *	francois.marechal@epfl.ch
Adress 1	LENI-ISE-STI
Adress 2	EPFL
City	1015 - Lausanne
Phone	+41 21 693 35 16
Fax	+ 41 21 693 35 02
Country *	Switzerland <input type="button" value="▼"/>
Login *	user
Favorite password *	*****

warning this password will be send uncripted and will be seen by the web site administration, use a password easy to remember and not your system password, If you forget your password, just send a password to the web site administrator

Activities * industry management student teaching

-----< Tecnology >-----< Industry

>-----

Interest - Press
CTRL+Mouse to make
several choices

fuel cells
industrial process
internal combustion engine
ORC

Air conditionning
Chemistry
Engineering
Metallurgy

Software * - Press
CTRL+Mouse to make
several choices

Mooleni
Pinchleni
Web

©2002 EPFL - [Contact](#)



Annexe 2□ Plateforme de téléchargement du logiciel PINCHLENI et système de questions fréquentes

**Only available in the paper version for the electronic
version connect to the [web site](#)**

Annexe 3 : « Targeting the optimal integration of utility for site scale applications », François Marechal and Boris Kalitventzeff, présenté en séance plénière à PRES2002 Fifth conference « Process integration, modelling and Optimisation for energy saving and pollution reduction » dans le cadre de CHISA 2002 15th International Congress of Chemical and Process Engineering et accepté pour publication dans Applied Thermal Engineering.

Targeting the integration of multi-period utility systems for site scale process integration

Francois Marechal^a, Boris Kalitventzeff^b

^a*Laboratory of Industrial Energy Systems, Swiss Federal Institute of Technology , CH-1015 Lausanne, mailto:francois.marechal@epfl.ch*

^b*Belsim s.a., Rue Georges Berotte, 29A, B-4470 Saint-Georges-sur-Meuse, mailto:boris.kalitventzeff@belsim.com*

Abstract

A method to target the optimal integration of the utility system within a chemical production site for multi-period operations has been developed. This paper is organised in three parts,

After introducing the type of problem to be solved, the first part report about the mathematical model used to solve the integration problem when the production specifications of the processes in the industrial site are constant (here average production levels).

In the second part of the paper, the multi-period utility requirements of the chemical processes are analysed. A optimisation problem is stated to compute the multi-period load scenario that defines the utility requirements with a minimum number of operating periods sets covering satisfactorily the yearly operation of the total site. A genetic algorithm is used to solve this problem. Furthermore, the generic mathematical formulation of the multi-period utility targeting is provided, including the possibility to deal with different sets of technologies for the synthesis of the utility system.

The third part of this communication presents the results obtained for a realistic problem described in the introduction. Discussion of the limits and the powerful features of the method developed are shortly presented.

Key words: Process integration, Combined heat and power, Multi-period integration, Utility system, process synthesis, Site scale optimisation, cogeneration

1 Introduction

Energy integration studies rely on the definition of the energy requirements at the nominal conditions. If the definition of such base case for a single process is usually easy to obtain, the problem becomes much more complex when the energy integration concerns site wide problems. Consider as an example a chemical site that includes 5 integrated chemical processes, the goal being to define the optimal cogeneration system to be considered for this chemical industrial site. Considering the nominal production levels for each of the sub-systems (processes), we define their energy requirement by a list of hot and cold streams (in the example the total number of process streams is about 60). Figure 1 shows the nominal composite curves of the five processes of the production site. Such data will allow to compute the possible energy savings by heat exchange inside the processes or between the processes.

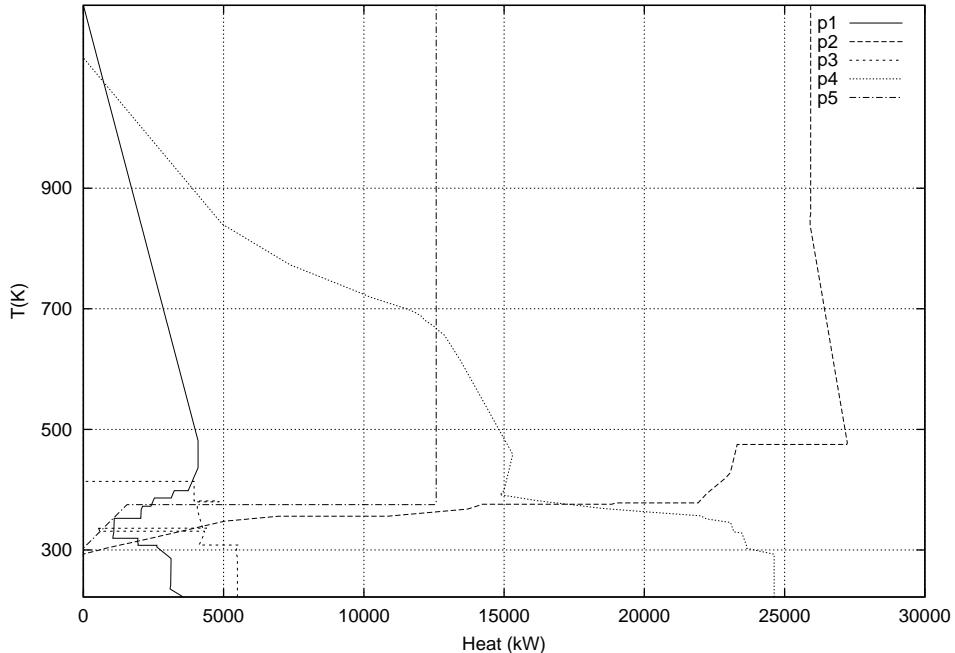


Fig. 1. Grand composite curves of the five processes concerned

Furthermore, the problem will concern not only the process-process heat exchanges but also the integration of the utility system and the possible use of different technologies in the utility system : combined heat and power production using steam turbines, cogeneration units, organic Rankine cycles, refrigeration systems, heat pumps, etc... In such cases, one has to consider not

only the nominal operating conditions of each process but also the possibility for these conditions to vary with time. In the process real life, the operating conditions and the environmental conditions to be considered over one year period (or more) may vary from one process to another and from time to time, making the optimal utility system design much more complex. These variations correspond for example

- (1) to variations of the production level of the processes with respect to the market conditions;
- (2) to market conditions variations, e.g. electricity price vary with day time and with seasons;
- (3) to production shifts or batches;
- (4) to efficiency variations with respect to the ambient conditions;
- (5) to maintenance of the equipments;
- (6) to discontinuous operation of the processes.

Figure 2 shows the measured dayly production levels of the 5 processes studied for a period of one year. We come back to figure 2 here after.

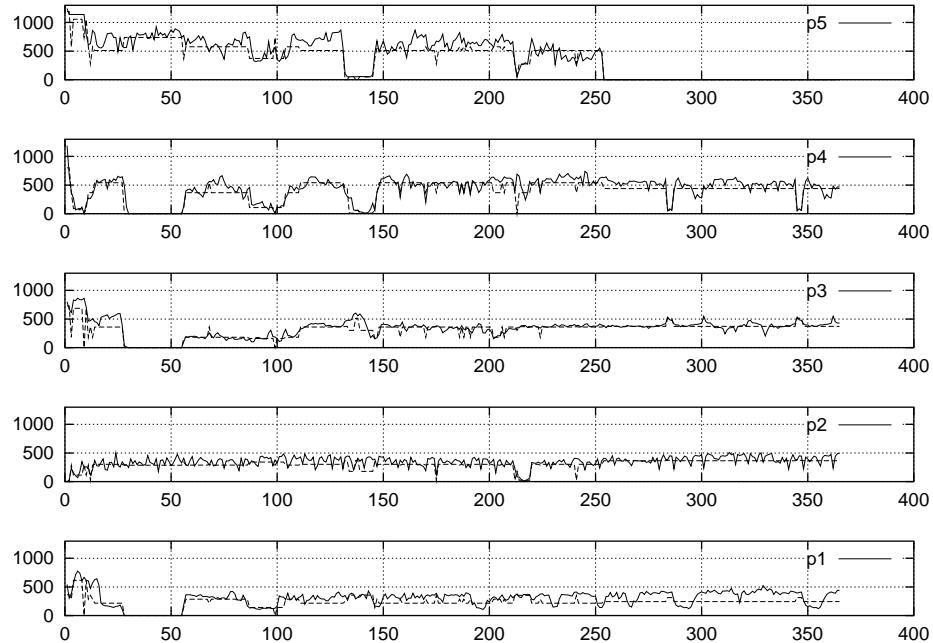


Fig. 2. Variation of the process levels with time and the selected levels

In the developed approach, we considered that the process requirements of the site has been obtained by multiplying the flow of the hot and cold streams

defined in nominal conditions by the corresponding level of utilisation at time t . This simplifying approach may be fine tuned in order to allow the use of specific streams definition at each time to account for the influence of the ambient temperature or the process material integration (effect of the process operating conditions on other processes). Figure 2 shows the Grand composite curve computed with the nominal conditions of the 5 processes (integrating the curves of figure 1 and compares it with the one obtained by averaging the level of utilisation of each sub-system (process) over the operating time period.

2 Utility system integration

In order to be able to synthesize the heat exchanger network, one first defines the complete list of hot and cold streams to be considered. This means that the utility system has to be considered together with the heat recovery network and that the utility flowrates have to be adapted at each time period because we have to consider the possible integration of the cogeneration units, the combined heat and power production with the steam network, the cooling system, the refrigeration system, the possible use of a heat pump, etc.

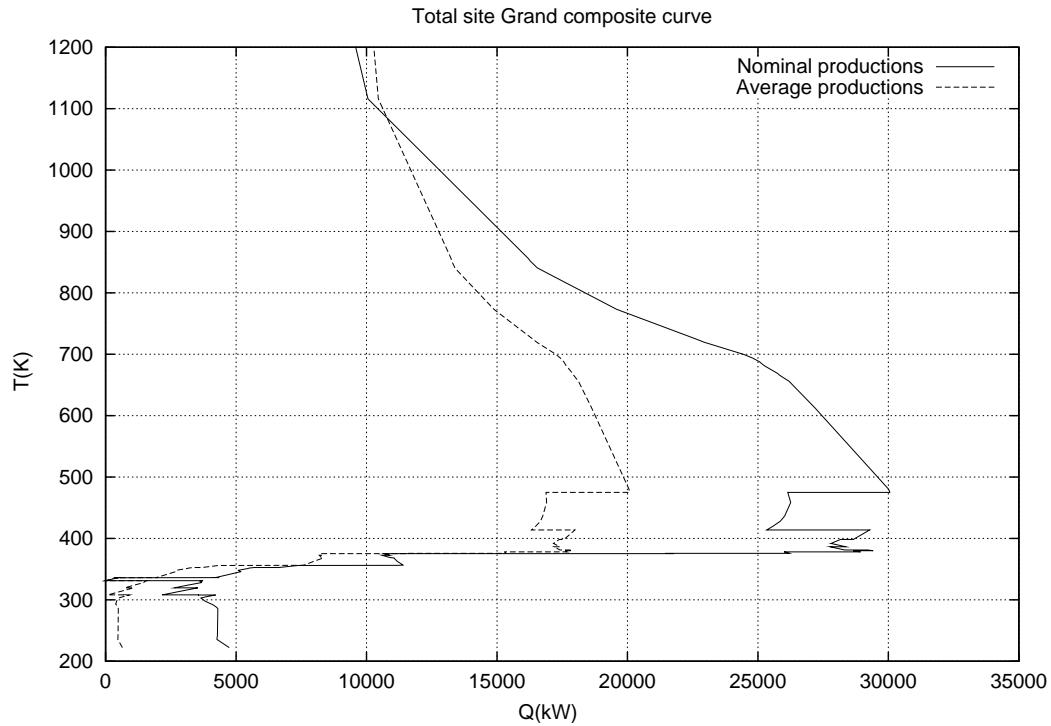


Fig. 3. Nominal and Average Grand composite curves of the integrated production site

2.1 heat pump integration

The pinch point location in the nominal Grand composite curve (figure 2) shows the possibility of integrating a heat pump that would save 2957 kW corresponding to 30% of the energy requirement. The mechanical power required for the savings corresponds to a COP of 10 due to the very low ΔT to be reached. It should be mentioned that this potential can not be identified if we use the average Grand composite curves of the same figure where the pinch location location is different making the heat pump useless. The same conclusion would have been taken when considering the Grand composite curve of process P3 concerned with the heat pump (figure 4) without considering its integration within the total site. Nevertheless, considering the possible potential of the heat-pump with respect to the total site integration, a heat pump has been considered as an alternative in the utility system integration.

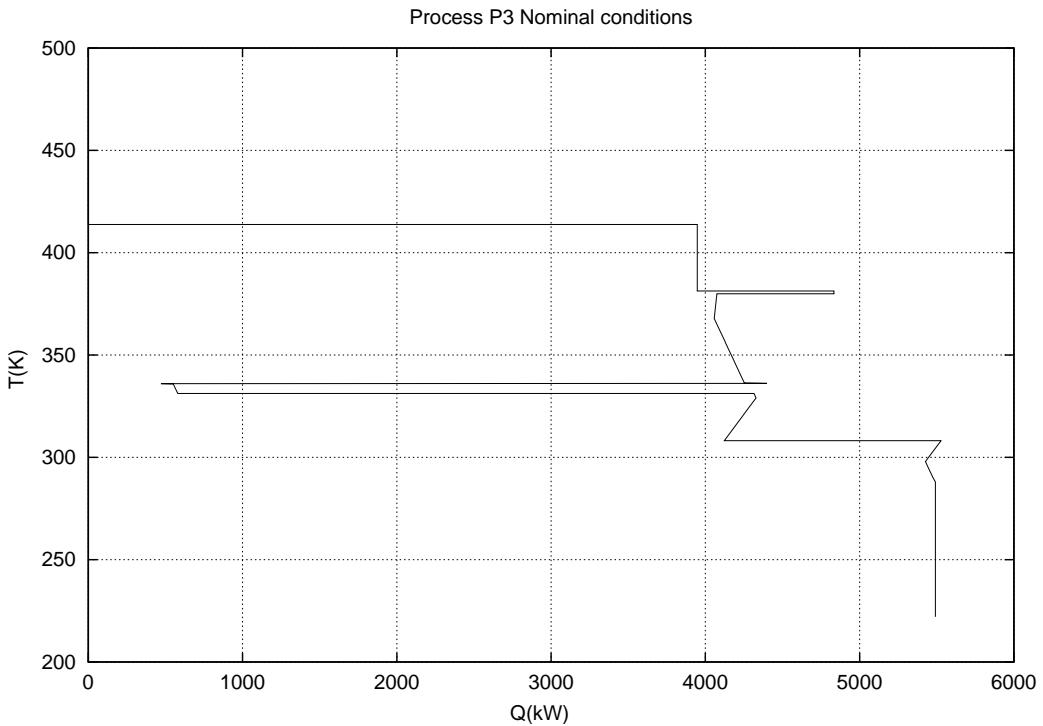


Fig. 4. Grand composite curves of process P3

2.2 Combined heat and power systems

Targeting the optimal integration of utility systems in the frame of the combined heat and power production has already been tackled by the authors and a modeling framework has been developed. It includes gas turbine and combustion system model (Marechal and Kalitventzoff, 1998), the steam network (Marechal and Kalitventzoff, 1999), the refrigeration system (Marechal and

Kalitventzeff, 2001) and the organic rankine cycles (Marechal and Kalitventzeff, 2001). Each technology introduces a set of equations considered together into a super-structure model to define a Mixed Integer Linear Programming (MILP) problem. In order to incorporate realistic market conditions for the technologies, the method will be extended here to incorporate the specific characteristics of the selected technologies stored in technology data bases reflecting the market conditions. This appeared to be necessary to represent standard sizes technologies like gas turbines or gas engines (Kalitventzeff and Marechal, 2000). The following algorithm has been developed :

- from the Grand composite curve, determine the characteristics of the heat load to be supplied by the cogeneration unit. As combined heat and power using steam network is considered the heat load to be supplied by the gas turbine should include the minimum energy requirement of the process and the production of mechanical power by the steam network. This production may be estimated using a Carnot cycle approximation and the integration of rectangles in the grand composite curve explained in Marechal and Kalitventzeff (1996);
- applying selection rules of the experts select in the data base a list of suitable cogeneration units available on the market and that have the potential of satisfying the energy requirements;
- using the technical description of the cogeneration unit in the data base, compute the performances of the equipment according to the environmental conditions (e.g. ambient temperature, fuel composition) with the thermo-economic models. This is done in two steps :
 - (1) model parameter estimation using the performances described in the technology data base;
 - (2) using the identified parameters, compute the equipment performances according to the process operating conditions. This calculation is made for each operating period;
- for each period, linearize the partial load performance (fuel consumption, mechanical power production, heat load, ...) as a function of the heat load supplied by the unit.

Table 1
Catalog characteristics of the selected gas turbines

	El (kWe)	Heat (kW)	η_e %	η_h %	IC K ϵ	OC ϵ /MWh
GT1	5500	8876	31.5	53.5	4438.4	4
GT2	5300	9024	30.1	54.2	4679	5
GT3	10613	15895	32.7	51.3	8710	4.7
GT4	8018	12904	32.0	53.6	6377	4.7

Table 2

Proposed pressure levels for the steam system :

P : header pressure, T header temperature, Tsat : saturation temperature, type : uses of the steam (steam produced (prod), steam consumed in the process (use), steam from condensing turbine (cond))

	P	T	Tsat	type
	(bar)	(K)	(K)	prod/use
S1	145	867	620	production
S2	54	744	544.7	production/use
S3	11	577.	456.	production/use
S4	4	477	412	production/use
S5	1.5	-	374	use
S6	0.1	-	320	use/cond

At the end of the utility system selection procedure, a set of five candidate gas turbines (table 1) has been proposed for the calculation together with a steam network whose temperature and pressure levels are given in table 2. The utility system also includes the cooling water system as well as a refrigeration unit.

2.3 Mathematical model description

The mathematical formulation of the targeting problem is used using the concept of Effect Modelling and Optimisation (EMO) developed by the authors (Marechal and Kalitventzoff , 1998). This is a Mixed Integer Linear Programming (MILP) formulation where each technology in the utility system is considered with an unknown level of utilisation that will be determined to satisfy the heat cascade constraints that define the process heat requirements, the mechanical power production balance as well as additional modeling constraints in order to minimise an objective function that is either operating cost, energy efficiency or total cost including the investment. We will here limit the model description to the integration of the combustion and cogeneration systems. This model represents the integration of the gas turbine including the partial load operation, the possible post-combustion of the gas turbine flue gas, the use of different fuels in the gas turbine and in the post combustion, and of course conventional combustion in a radiative furnace with possible air enrichment or air preheating. This is obtained by adding the following integration constraints.

2.3.1 Gas turbine and combustion system

Hot stream corresponding to the outlet of a gas turbine g :

$$Q_g^{gt} = f_g * \dot{m}_g * cpf_g * (TOT_g - Tstack_g) \quad (1)$$

- where \dot{m}_g is the flue gas flowrate at the outlet of the gas turbine g in nominal conditions. These values result from the simulation of the gas turbine g
- Q_g^{gt} is the total heat load of the fumes from the gas turbine g
- cpf_g is the mean cp of the flue gas at the outlet of the gas turbine g
- TOT_g is the temperature of the flue gas of the gas turbine g
- $Tstack_g$ is the stack target temperature accepted for the outlet of the gas turbine g after heat recovery
- f_g is level of utilisation of gas turbine g , $f_g^{min} * y_g \leq f_g \leq y_g * f_g^{max}$
- y_g is the integer variable representing the use or not (1,0) of the gas turbine g
- $f_g^{min(max)}$ is the minimum (maximum) level of utilisation of the gas turbine g

Hot stream corresponding to the post combustion (heat available for convective heat exchange)

$$Q_g^{pc} = f_g^{pc} * \dot{m}_g * cpf_g * (Trad - TOT_g) \quad (2)$$

- where $Trad$ is an arbitrary temperature used in the combustion model representing the limit of the radiative exchange
- f_g^{pc} is the fraction of the nominal gas turbine flue gas flowrate used for post combustion
- Q_g^{pc} is the supplementary heat load supplied by the flowrate fraction of the flue gas flowrate of gas turbine g used in the post combustion device

Fuel consumption

$$\sum_{c=1}^{n_{cgt}} f_c^g * LHV_c - \sum_{g=1}^{n_g} (y_g * FCI_g + f_g * FCP_g) = 0 \quad (3)$$

- where n_g is the number of gas turbines proposed in the utility system super configuration
- n_{cgt} is the number fuels available for combustion in the gas turbines
- LHV_c the lower heating value of the fuel c
- f_c^g the flowrate of the fuel c in the gas turbine g

Electricity production with the gas turbines W_{gt}

$$W_{gt} - \sum_{g=1}^{n_g} (y_g * WI_g + f_g * WP_g) = 0 \quad (4)$$

- where $y_g * FCI_g + f_g * FCP_g$ is the linearised fuel consumption of gas turbine g as a function of its level of utilisation
- $y_g * WI_g + f_g * WP_g$ is the linearised mechanical power production of the gas turbine g as a function of the level of utilisation

The values for the linearisation are computed by simulation considering the partial load operation of the gas turbine. For each gas turbine g , the unknowns are f_g , y_g , f_g^{pc} while the other parameters are obtained from the thermo-economic models. The quality of the linearisation will mainly depend on the range in which the part load operation is expected to happen in the optimal situation.

The operating costs OC_{gt} and the investment costs IC_{gt} of the selected gas turbines are computed by :

$$\sum_{g=1}^{n_g} (y_g * OCI_g + f_g * OCP_g) - OC_{gt} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^{n_g} y_g * ICI_g - IC_{gt} = 0 \quad (6)$$

- where $y_g * OCI_g + f_g * OCP_g$ is the linearised maintenance cost of gas turbine g as a function of its level of utilisation ;

$y_g * ICI_g$ is the investment cost of gas turbine g from the data base catalog;

The fraction of the flue gas of the gas turbine used in the post combustion is

limited to the level of utilisation of the gas turbine g .

$$f_g^{pc} \leq f_g \quad \forall g = 1, n_g \quad (7)$$

The combustion model is made of different equations: (8) includes different terms representing the oxygen balance required by the combustion of the fuels and the oxygen supplied by air and post combustion flue gas.

$$\sum_{g=1}^{n_g} f_g^{pc} * \dot{m}_g * x_g^{O_2} + f_{air} * x_{air}^{O_2} - \sum_{a=1}^{n_a} f_a * \dot{m}_a * x_a^{O_2} - \sum_{c=1}^{n_c} f_c^c * \kappa_c^{O_2} \geq 0 \quad (8)$$

where $x_g^{O_2}$	is the oxygen content of the flue gas at the outlet of the gas turbine g
$x_{air}^{O_2}$	is the oxygen content of the ambient air
f_{air}	is the amount of air used by the combustion in the system
f_c	is the flowrate of fuel c , ($f_c \leq f_c^{max}$), its specific cost is C_c
\dot{m}_c^f	is the fumes flowrate resulting from the combustion of fuel c
cp_f^f	is the mean specific heat of the fumes resulting from combustion. This cp is considered between T_{rad} and T_{stack}
n_c	is the number of fuels that can be used in the system including n_{cgt}
$\kappa_c^{O_2}$	is the oxygen requirement per unit of fuel c . For practical reasons, the oxygen requirement includes the minimum oxygen excess for this fuel
$x_a^{O_2}$	is the oxygen content of the enriched air stream leaving the air separation unit a
\dot{m}_a	is the nominal flowrate of enriched air leaving the air separation unit a
f_a	is the level of utilisation of air separation unit a , $f_a^{min} * y_a \leq f_a \leq f_a^{max} * y_a$
y_a	is the integer variable representing the use or not (1,0) of the air separation unit a
$f_a^{min(max)}$	is the minimum (maximum) level of utilisation of the air separation unit a
n_a	is the number of air separation units considered in the system

Fuel consumption balance for the fuels that might be used either in gas turbine

or in standard combustion.

$$f_c^c + \sum_{g=1}^{n_g} f_c^g - f_c = 0 \quad (9)$$

High temperature balance : radiative exchange model above $Trad$

$$\begin{aligned} \sum_{c=1}^{n_c} (f_c * (LHV_c + (cp_{air} * \frac{\kappa_c^{O_2}}{x_{air}^{O_2}} * (Trad - T_0)))) - f_{air} * cp_{air} * (Trad - T_0) \\ - \sum_{a=1}^{n_a} f_a * \dot{m}_a * cp_a * (Trad - TO_a) + Q_{prh} - Q_{rad} = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

Low temperature balance : convective exchange below $Trad$

$$\begin{aligned} f_{air} * cp_{air} * (Trad - T_{stack}) + \sum_{c=1}^{n_c} (f_c * (\dot{m}_c^f * cp_{fc} - cp_{air} * \frac{\kappa_c^{O_2}}{x_{air}^{O_2}}) * (Trad - T_{stack})) \\ + \sum_{a=1}^{n_a} f_a * \dot{m}_a * cp_a * (Trad - T_{stack}) - Q_{cnv} = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

where Q_{rad} is the total amount of heat available above $Trad$

Q_{cnv} is the total amount of heat available from $Trad$ to T_{stack}

LHV_c is the lower heating value of the fuel c . This value is the value computed by simulation of the combustion using the minimum accepted value of the oxygen content in the fumes

T_0 is the reference temperature used for computing the LHV

T_{air}^{in} is the inlet temperature of air

Q_{prh} is the heat load of air preheating, the existence of the air preheating equipment is defined by an integer variable y_{prh} and the following equation : $y_{prh}Q_{prh}^{min} \leq Q_{prh} \leq y_{prh}Q_{prh}^{max}$. The investment cost of the air preheating device is computed by linearising the air preheater cost by $IC_{prh} = ICF_{prh}y_{prh} + ICP_{prh}Q_{prh}$

cp_a is the mean specific heat of the enriched air leaving unit a at a temperature of TO_a .

2.3.2 Air preheating : outlet temperature calculation

In this model, the air preheating temperature is unknown and its optimal value has to be computed. When the heat recovery system is used, the optimal preheating temperature is a non trivial task, since the temperature is used to generate the list of the constraints. This makes the problem non linear and

discontinuous (i.e. according to the temperature the stream will appear or not in the heat cascade constraints). Some techniques have been tried to solve this problem as a non linear programming (in our case mixed integer) problem using smooth approximation techniques (e.g. Duran and Grossmann (1986)). Here, we decided to keep the problem linear and continuous by discretizing the temperature range in which the air preheating will take place in n_i intervals of ΔT . The air preheating stream is therefore defined by a list of cold streams from T_i^{air} to $T_{i+1}^{air} = T_i^{air} + \Delta T$ and by adding the following constraints :

$$f_{air} \geq f_{a_i} \quad \forall i = 1, \dots, n_i \quad (12a)$$

$$Q_{prh} = \sum_{i=1}^{n_i} f_{a_i} c_{p,air,i} (T_{i+1} - T_i) \quad (12b)$$

with f_{a_i} the flowrate of air preheated from T_i to T_{i+1} .

$c_{p,air,i}$ the specific heat capacity of the air flowrate between T_i to T_{i+1} .

In the combustion model, the optimal temperature calculation model is also used to compute the outlet temperature of the air and enriched air preheating, fuel preheating as well as to compute the outlet temperature at the stack. This calculation is made in two steps :

- (1) solve the model and compute the optimal flowrates in each interval (f_{a_i});
- (2) compute the resulting temperature $T_{o_{n_i}}$ by solving from $i = 1$ to n_i ,
 $T_{o_i} = \frac{(f_{a_{i-1}} - f_{a_i})T_{o_{i-1}} + f_{a_i}T_{i+1}}{f_{a_{i-1}}}$ with $T_{o_0} = T_{a_{in}}$ the inlet temperature of the stream a .

The precision of the model is related to the size of the discretizing temperature intervals. We have to consider a compromise between the precision required for the equipment sizing and the number of variables. A similar formulation is also used to compute the optimal temperature of the gas turbine flue gas after heat recovery.

This systematic choice has been made to keep the robustness advantage of the MILP formulation.

2.4 Application of the model

The set of equations described above is added to the MILP problem formulation used to solve the utility integration targeting problem (Marechal and Kalitventzoff , 1998). Applying this model in the average conditions, we obtained a solution whose integration is represented by the integrated composite

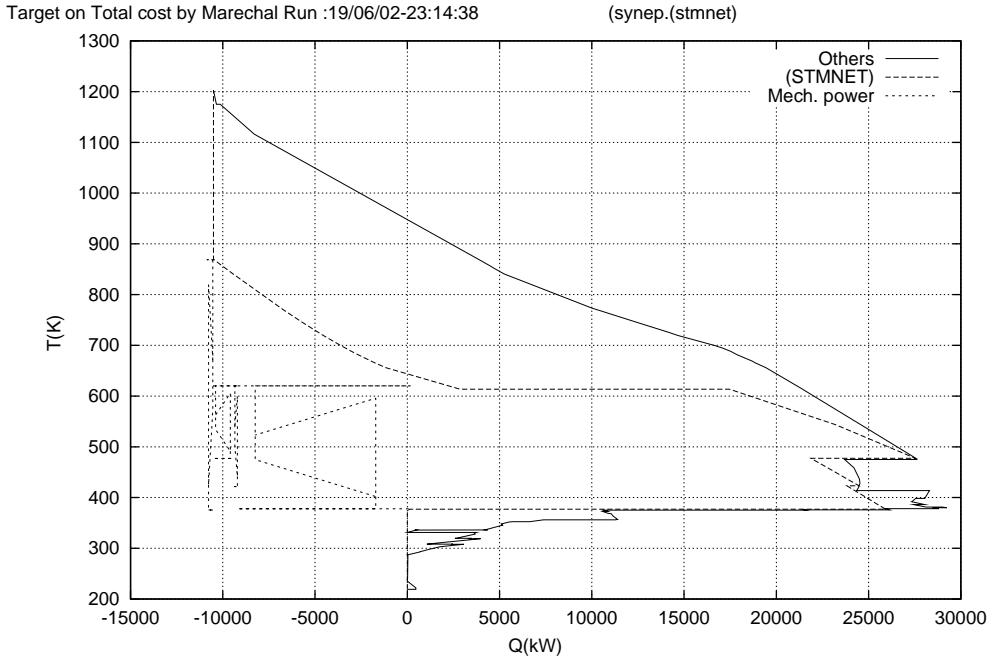


Fig. 5. Integrated composite curves of the steam network of the production site curves of figure 5. The interest of the steam network in the system stands in the combined heat and power production but also is the heat transfer from one exothermic process and endothermic ones. The steam network allows also considering the valorisation of the exergetic potential of the total system. In our example, the steam network works with high pressure steam that is produced from the exothermic processes of the chemical industrial site. This is important when considering a gas turbine integration since the gas turbine will not be able to reach a temperature compatible with steam pressure levels shown on figure 5.

3 Multi-period problem

When considering the energy system design and especially when dealing with industrial site process integration, the multi-period approach reveals to be of a great importance because it has to represent the opportunities of integration together with the need of integrating the utility system in an appropriate manner and more specially of considering the combined heat and power production. This problem is even more complex when technologies used in the

utility system have to be chosen among a list of fixed size units (e.g. gas turbines or internal combustion engines) and when synergies between technologies (e.g. between a gas turbine, the steam network and the processes) have to be valorized.

The multi-period problem is therefore to select the appropriate technologies, to compute their size and determine the optimal operating strategy that will minimize the total cost of satisfying the yearly requirements of the integrated system. In chapter 2, we did state the state and solve the problem for constant process production specifications. In chapter 3, we will model the global system requirements under varying production scenarios and present our mathematical formulation of the multi-period energy integration targeting problem.

3.1 Multi-period synthesis problem: generic formulation

The use of MI(N)LP problems for solving multi-period process synthesis problems has been reviewed by (Grossmann and Santibanez , 1980) and (Grossmann , 1985). Multi-period optimisation is a well known problem that has been considered mainly in the heat exchanger network design; e.g. (Floudas and Grossmann , 1986), (Floudas and Grossmann , 1987), (Marechal and Kalitventzoff , 1989). The generic problem is formulated as follows :

$$\underset{y_t, x_t, y, s}{\text{Min}} \sum_{t=1}^{n_t} t_t * c(x_t, s) + I(y, s) \quad (13)$$

Submitted to :

$$h_t(x_t, s) = 0 \quad \forall t = 1, \dots, n_t \quad (14a)$$

$$g_t(x_t, s) \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, n_t \quad (14b)$$

$$y_t \leq y \quad \forall t = 1, \dots, n_t \quad (14c)$$

$$y_t, y \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, n_t \quad (14d)$$

where $h_t(x_t, s)$ is the set of modelling constraints during the period t ;

$g_t(x_t, s)$ is the set of inequality constraints during the period t ;

x_t is an array representing the operating conditions of the equipments during time period t ;

y_t is an integer variable representing the use or not of an equipment during time period t ;

- s is the array of the sizing parameters of the equipment sets, once an equipment is selected (see value of y), it is used throughout all the operating periods;
- y is the array of the integer variables representing the selection of the equipment;
- $c(x_t, s)$ is the operating cost during the operating period i ;
- $I(s, y)$ is the total annualised cost of the equipments of size s ;
- t_t is the operation time of period t ;

3.2 Identify the multi-period load scenario

In the multi-period synthesis problem formulation, the variables s and y are common to all the periods while the others variables y_t and x_t refer to a given period t . This offers a great flexibility in terms of problem definition and decomposition for the solving procedure. This formulation relies on the decomposition of the overall operating time into a limited number of well chosen operating periods. The most rigorous approach would be to model a complete year of operation day by day or even hour per hour. Unfortunately, this would lead to an unacceptable number of decision variables since the optimal value of each decision (y_t) and the level of operation(x_t) of the selected technologies would have to be computed for each period t . If we assume that no heat storage is considered, the yearly process requirements might be represented by a limited set of requirement levels for each of the processes in the global system. The usual approach (e.g. (Grossmann and Santibanez , 1980)) consists in defining for each of the sub-systems concerned (j), a list of operating period (k, j) identified by a starting ($t_{k,j}^{start}$) and an ending ($t_{k,j}^{end}$) time associated with a level of operation ($L_{k,j}$). Computing over the time horizon (from $t = 0$ to $\max(t_{k,j}^{end})$), it is possible to define a finite number of periods p corresponding to a set of $L_{p,j}$ and a given operating time period $t_p = \Delta t_{k,j}^x$.

If this task is rather easy when only one requirement (or process) is considered or when all the variations are simultaneous, the problem becomes much more difficult when different processes are operated independently on the same process site or when the requirements are not simultaneous. Even in this situation, and assuming that each process is represented by a very limited number of operating conditions, the number of periods resulting from the integration of the different processes remains high (figure 2). When no heat storage is envisaged, the number of sets can be reduced because the time sequence is not important anymore meaning for example that nights and days operation can be assembled to form 2 distinct periods with an operating time period corresponding to the sum of the individual periods. If heat storage is considered the

method can not be used because in this case, the level of the heat storage will vary with time and the sequence of operations will have to be maintained. If more than one process is considered the simultaneity of the operations has to be considered and summation is not necessarily possible due to the different nature of the process requirements.

To tackle the problem, an optimisation problem (15) has been set up. It consists in defining the optimal value of n_p specified production sets of n_j sub-system levels $L_{j,p}$ that will represent the levels of operation of sub-system j in the set p . We should note that in this approach the variable $L_{j,p}$ may also be used to represent the variation of a price condition (e.g. electricity). When different operating modes exist for one process (e.g. production /cleaning) two different sub-systems will be considered. The problem formulation is the following :

$$\min_{L_{j,p}} \sum_{t=1}^{n_t} \left\{ \min_{p=1, \dots, n_p} \sum_{j=1}^{n_j} \left(\frac{L_{j,p} - q_{j,t}}{\omega_j} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

where $q_{j,t}$ is the production level of sub-system j during the time period t ;

ω_j is a weight factor that allows comparing the production levels of sub-system j with the other sub-systems;

$L_{j,p}$ is the production level considered for sub-system j in the set p ;

n_t is the number of time periods in process measurements;

n_p is the number of specified production sets;

n_j is the number of independent sub-systems considered.

Literally this mathematical formulation tries to find the values of n_p sets of n_j sub-system levels that minimize the error between the estimated requirement $L_{j,p}$ and the observed one $q_{j,t}$ over the observed period. The operating time t_p corresponding to the set p is obtained by summing up the t_t times the $L_{j,p}$ are selected. This optimisation problem is a least square non linear unconstrained, min-min problem that is by definition multi-modal and discontinuous optimisation problem, discontinuous because of the min-min problem and multi-modal because the sets p can be permuted without affecting the solution . The resolution of the problem is therefore not so easy. A genetic algorithm (Leyland , 2002) has been used to solve this problem and gave satisfactory results, that are shown on figure ?? where dotted lines represent the load scenario model with $n_p = 10$ sets of simultaneous levels. Replacing the n_t t_t periods by the n_p t_p periods, the dimension of the problem 13 becomes smaller.

The variations of the process production levels has been identified solving the min-min optimisation problem. The results of the integration period by period are given on table 3 where "Li" are the 10 period levels obtained, "MER hot" is the heat to be supplied to the system, "MER cold" is the heat to be removed by the cooling water system and "MER frg" refers to the heat to be removed by a refrigeration system.

Table 3

Minimum energy requirements and levels of operations in the different periods

	MER hot (kW)	MER cold (kW)	MER frg (kW)	time h/year
L1	22581.	0.	155.	432
L2	0.	18119.7	1027.8	48
L3	19814.	987.	347.	192
L4	10146.	1411.	380.	264
L5	27771.	0.	0.	720
L6	13311.	4897.	751.	144
L7	0.	10526.	677.	240
L8	12252.	173.	311.	1224
L9	7061.7	831.	310.	2904
L10	8539.	577.	278.	2592
Average	10270.	385.6	261	8760.

Considering the multi-period strategy, we observe that the process requirements vary with time from a supply of 27771 kW to a production of 18120 kW in exothermic conditions. This is due to the relative level of usage of exothermic and endothermic processes.

3.3 Mathematical formulation of the multi-period utility system targeting problem

In this paper, we describe the adaptation of the utility system synthesis to multiperiod problems where we consider simultaneously utility system, heat recovery system and combined heat and power production. The model for representing one period of operation (Li) is given above in chapter 2, below we generalize the formulation representing the level of utilisation of each utility system technology by the generic integer variables y_w representing the existence of the technology w and f_w the level of utilisation. The multi-period

system creates variables y_w^p and f_w^p for each operating period p . The objective function is the total cost including the operating costs and the annualised investment cost both expressed in Monetary Units (MU) per year. The annualising factor is computed from the annualising rate and the life time of the investment. In case of load variations, we have to determine in each time period the extend of use of the technology (partial load operation) to satisfy the requirements of the whole industrial site. In the equation system (16), we represent the Effect Modelling and Optimisation (EMO) models by an additional set a constraints that are written in a generic form.

$$\begin{aligned} \min_{R_r^p, y_w^p, f_w^p, y_w^{max}, f_w^{max}} & \sum_{p=1}^{n_p} \left(\sum_{w=1}^{n_w} (C2_w^p f_w^p) + Cel^p Wel^p - Cel_v^p Wel_s^p \right) * t_p \\ & + \sum_{w=1}^{n_w} (C1_w y_w^{max}) + \frac{1}{\tau} \sum_{w=1}^{n_w} (ICF_w y_w^{max} + ICP_w f_w^{max}) \end{aligned} \quad (16)$$

subject to

Heat balance of the temperature intervals

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w^p q_{w,r} + \sum_{i=1}^n Q_{i,r} * L_{i,p} + R_{r+1}^p - R_r^p = 0 \quad \begin{matrix} \forall p = 1, \dots, n_p \\ \forall r = 1, \dots, n_r \end{matrix} \quad (17)$$

Electricity consumption:

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w^p w_w + Wel^p - L_{c,p} * Wc \geq 0 \quad \forall p = 1, \dots, n_p \quad (18)$$

Electricity exportation

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w^p w_w + Wel^p - Wel_s^p - L_{c,p} * Wc = 0 \quad \forall p = 1, \dots, n_p \quad (19)$$

Other additional constraints

$$\sum_{w=1}^{n_w} a_x^{i,p} f_w^p + c_w^{i,p} y_w^p + \sum_{k=1}^{n_x} d_k^{i,p} x_k^t \geq b_i^p \quad \begin{matrix} \forall i = 1, \dots, n_e \\ \forall p = 1, \dots, n_p \end{matrix} \quad (20)$$

$$x_{min_k} \leq x_k^p \leq x_{max_k} \quad \begin{matrix} \forall k = 1, \dots, n_x \\ \forall p = 1, \dots, n_p \end{matrix} \quad (21)$$

Existence of operation w during the time period p:

$$f_{min_w} y_w^p \leq f_w^p \leq f_{max_w} y_w^p \quad \begin{matrix} \forall w = 1, \dots, n_w \\ \forall p = 1, \dots, n_p \end{matrix} \quad (22)$$

$$y_w^p \in \{0, 1\} \quad (23)$$

Thermodynamic feasibility of the heat recovery and utility systems

$$Wel^p \geq 0, Wel_s^p \geq 0 \quad (24)$$

$$R_1^p = 0, R_{n_r+1}^p = 0, R_r^p \geq 0 \quad \forall r=1, \dots, n_r+1 \quad \forall p=1, \dots, n_p \quad (25)$$

Maximum size of operation w

$$f_w^{max} - f_w^p \geq 0 \quad \forall w=1, \dots, n_w \quad \forall p=1, \dots, n_p \quad (26)$$

$$x_k^{max} - x_k^p \geq 0 \quad \forall k=1, \dots, n_x \quad \forall p=1, \dots, n_p \quad (27)$$

Use or not of operation w

$$y_w^{max} - y_w^p \geq 0 \quad \forall w=1, \dots, n_w \quad \forall p=1, \dots, n_p \quad (28)$$

with	n	the number of specified process streams;
	n_r	the number of temperature intervals;
	R_r^p	the energy cascaded from the temperature interval r to the lower temperature intervals in the time period p ;
	Q_{ir}	the heat load of the reference level of process stream i in the temperature interval r ; $Q_{ir} > 0$ for hot streams and ≤ 0 for cold streams;
	$L_{i,p}$	the level factor of use of stream i during the time period p ;
	n_w	the number of technologies proposed in the super configuration of the utility system;
	n_p	the number of time period in the problem;
	q_{wr}	the heat load of the technology w in the temperature interval r for a given reference flowrate, $q_{wr} > 0$ for a hot stream;
	f_w^p	the multiplication factor of the reference flowrate of the technology w in the optimal situation during the time period p ;
	w_w	the mechanical power produced by the reference flowrate of technology w ; $w_{w,t} < 0$ for a mechanical power consumer and > 0 for a producer;
	Cel_s^p	the selling price of electricity during the time period p ;
	Wel_s^p	the net production of electricity during the time period p ;
	Cel^p	the electricity cost during the time period p ;
	Wel^t	the net import of electricity during the time period p ;

Wc	the overall mechanical power needs of the process; $Wc < 0$ if the overall balance corresponds to a mechanical power production
x_k^p	the (n_x) additional variables used in the additional equations of the technology models for time period p .
$a_w^{i,p}$ $c_w^{i,p}$	respectively the coefficients of the multiplication factor of technology w in the constraint i in the effect models during the time period p .
$d_k^{i,p}$ b_i^p	respectively the coefficients of the additional variables in the constraint i in the effect models during time period p ;
x_{min_r} x_{max_r}	respectively the $\frac{minimum}{maximum}$ bounds of x_r .
f_{min_w} f_{max_w}	the $\frac{minimum}{maximum}$ values accepted for f_w^p
y_w^p	the integer variable associated with the use of the technology w during the time period p ;
$C1_w$	the fixed cost of using the technology w , this value is expressed in monetary units (MU) per year;
$C2_w^p$	the proportional cost of using the technology w during the time period p . This value is defined in MU/unit of time period;
ICF_w	the fixed cost related to the investment of using operation w ; ICF_w is expressed in Monetary Units (MU) and refers to the investment cost of the combustion and cogeneration equipments as defined above as well as to the other equipments considered in the utility system (turbines, heat pumps, refrigeration systems,...).
ICP_w	the proportional cost related to the investment of using the operation w , ICP_w is expressed in MU/(unit of w).
τ	is the annualising factor of the investment. This value is used to express the investment of the IEST's in MU/year. $\tau = \frac{(1+i)^{n_{years}} - 1}{i(1+i)^{n_{years}}}$ is the annualisation factor of the investment ($years^{-1}$) for a annualisation interest i and an expected equipment life n_{years} .
y_w^{max}	the maximum value of the integer variable associated with the use of the operation w over the overall the time period. If the operation w is used at least once during the overall time period the value of y_w^{max} is equal to 1 and the related investment will be considered as well as the related fixed operating cost.

- f_w^{max} the maximum value of the multiplication factor of operation w over the overall the time period. This value represents the (maximum) size of the technology to be installed and is therefore related to the investment for the corresponding IEST.
- t_p the total operating time of period p .

The developments have been made in such a way that for each time period the same MILP problem is generated. The equations for computing the maximum sizes and the objective function are added after a loop for the n_p time periods. For generating multiple solutions, the integer cut constraints (i.e.(Duran and Grossmann , 1986)) will act on the y_w^{max} variables. The equation will be in the following form :

$$ProblemMILP_k \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^{n_y} ((2(y_j^{max})^k - 1)y_j^{max}) \leq \sum_{j=1}^{n_y} ((y_j^{max})^k - 1) \quad (30)$$

with $(y_j^{max})^k$ the value of the integer variable y_j^{max} in the solution of problem k ;

n_y the number of alternatives to be studied.

3.4 The limitations of the approach

The proposed approach does not allow to compute heat storage between two time periods. This would require additional equations to compute the overall amount of heat to be stored. In this case the method for identifying the time periods can not be applied since the sequence of the operations has to be considered. In this case, the size of the MILP problem will increase consequently.

The approach proposed uses a linearized partial load efficiency computed by simulation, iterative sequence of calculations might be used to verify the optimality of the solutions proposed.

The size of the problem increases when the number of periods increases since it consists in n_p MILP problems concatenated and requires efficient large scale MILP algorithms. Let us remark that there are only little relations between the different sub-sets of the problem, the link between the different time periods being obtained by the definition of y_w^{max} and f_w^{max} . This means that when the objective function is the operating cost and that no fixed cost is considered or when the objective function is the minimum exergy losses, the results will be obtained by solving the problem successively for the different time periods and

by summing up the different objective functions obtained. If the total cost is used as an objective function or if fixed cost are used to define the operating cost, the method presented here above can be safely used.

4 Application

The size of the problem stated in the introduction with 10 time periods sets is of 1900 constraints and 1600 variables including 40 integer variables. Table 4 gives the electricity production, the fuel consumption and the total cost of the different solutions found. The column "CHP eff" represents the marginal efficiency of the electricity power production. It is computed by the ratio between the electricity production and the extra fuel consumed for this production, i.e. $\frac{El(MWh_e)}{Fuel(MWh) - \frac{Mer(MWh)}{\eta_{th}}}$ with $\eta_{th} = 95\%$ the efficiency of a conventional boiler. We should note here that choosing an efficiency of 90 % rather than 95% would lead to efficiencies higher than unity for some of the solutions. These high values of marginal efficiencies are explained by the steam network production that valorises the exergy potential of the exothermic processes. The heat from the processes is used to produce high pressure steam that is expanded and then used in other processes above the pinch. According to the optimal CHP placement rule (Townsend D.W., Linnhoff B. , 1983), above the pinch, one fuel heat unit per unit mechanical power produced. When the utility system is considered, the additional unit of fuel heat is the heat supplied by the combustion of one unit of fuel, therefore the efficiency is lower than one in terms of lower heating value. In case of the gas turbine, the fuel heat of the gas turbine is the heat available in the fumes cooled down from Q_g^{gt} (1), that is itself related to a supplement of mechanical power produced W_{gt} (4). In the results presented in table 4, more than one solution is presented for the same gas turbine.

These cases have been computed by varying the price of the electricity. In table 4, the results are presented for the same price of Electricity for comparison purposes. For low prices of electricity, the gas turbine is not used in all the periods : it is shut down during periods where the process is not requiring heat (solution GTx_{low}). When the electricity price is higher (solution GTx_{int}), the gas turbine is always used and the post combustion fuel is adapted to satisfy the heat requirements of the whole plant. The gas turbine is used even during periods where there is no heat to supply to the process. In this case, the extra amount of steam produced by the gas turbine is expanded in a condensing steam turbine. For higher prices of electricity (GTx_{high}), the gas turbine is always used at its maximum as well as the post combustion such that the maximum production of electricity is reached by expanding high pressure steam in the condensing turbine. $GT1_{int}^{hpmp}$ refers to a solution with a heat

pump. In this case, the heat requirement is reduced by consuming mechanical power in the heat pump. This reduces the overall mechanical power production but in the same time the fuel consumption. The operating cost of the $GT1_{int}^{hpmp}$ solution is therefore lower than the operating cost of $GT1_{int}$ but the benefit (for the energy prices used) does not compensate the heat pump investment. It should be mentioned that the solution with the heat pump has different break-even energy cost than the solutions without heat pump.

Table 4

Results with different gas turbines, Natural gas price : 0,135 ϵ/kg , Electricity : 35 ϵ/MWh (high)

	Electricity (MWh)	Fuel (MWh)	Total cost $\epsilon/year$	CHP Eff (%)	Comments
$GT3_{low}$	116494	248996	263893	78.6	GT shut down
$GT1_{int}$	90303	210622	-226811	82.2	Min post combustion
$GT3_{int}$	143949	304960	-78213	70.5	Min post combustion
$GT4_{int}$	113220	243344	-220005	79.4	Min post combustion
$GT1_{high}$	139690	356721	-377481	54.7	Max post combustion
$GT2_{high}$	137665	354075	-209181	54.4	Max post combustion
$GT3_{high}$	192503	451327	-196827	54.9	Max post combustion
$GT4_{high}$	166219	400155	-381427	55.5	Max post combustion
$GT1_{int}^{hpmp}$	88428	204451	-220910	85.3	Min post combustion +hpmp

The detailed results of the system integration for the case $GT1_{int}^{hpmp}$ are summarised in table 5 where we present the flowrate in the condensing stage of the steam turbine, the mechanical power consumption of the heat pump, the mechanical power production of the gas turbine and the overall CHP system, as well as the fuel consumption (expressed in lower heating values) and the CHP efficiency. One should observe that the heat pump is shut down during some of the operating period. The use of the condensing turbine in period L2 explains by the fact that the process is a threshold problem with an excess of heat to be evacuated from the process (see table 3). This excess of energy is therefore used to produce mechanical power in the condensing turbine.

The solution presented here allows to illustrate the interest of the approach, we identify that the gas turbine is profitable especially by the use of the combined heat and power production from the steam network. It should be observed that for period where the processes are exothermic, the gas turbine is used and a condensing level is considered for the steam turbine in order to maximise the electricity production. The comparison between $GT4$ et $GT1$ solutions

is interesting : for medium prices of electricity, the best solution is $GT1_{int}$ that is smaller while if the electricity price is increased, the best solution is $GT4_{high}$. This illustrates the interest of generating multiple solutions rather than searching just for a unique solution. Sensitivity analysis will therefore be required to identify the best solution.

5 Discussion

Some difficulties have been observed when using this approach. In order to make it work properly, one has to use a coherent data set for computing the objective function. We stress here on the importance of the relative value of electricity and fuel prices with respect to the investment cost. We observed situations where the marginal cost of producing electricity by the gas turbine becomes smaller than zero. In this case, as we are working with a linear programming system, the solution is the use of **all** the gas turbines at the maximum for the whole year. This solution just says that the marginal efficiency of the gas turbine combined with the steam turbine without considering the cogeneration becomes profitable to produce electricity at the selected price.

On figure 6, we show the total cost of three situations resulting from the use of the same gas turbine ($GT3$). This shows that according to the price of electricity different solutions are optimal. This renders the use of strict optimisation procedure very difficult : sensitivity analysis combined with the

Table 5
Details of the solution computed with $GT1_{int}^{hpmp}$

	CND	HPMP	GT	CHP	FUEL	EFF
	kmol/s	kWe	kWe	kWe	kW _{LHV}	%
L1	0.013	OFF	5515.0	11455.0	36640.8	89.0
L2	0.349	45.7	5515.0	13679.0	16849.8	81.2
L3	OFF	130.2	5515.0	10359.0	31916.7	93.7
L4	OFF	110.1	5515.0	7967.3	19829.7	87.1
L5	0.020	OFF	5515.0	12404.0	43015.1	90.0
L6	OFF	327.9	5515.0	9403.0	22696.2	108.3
L7	0.309	172.1	5515.0	11246.0	16849.8	66.7
L8	OFF	OFF	5515.0	10379.0	25110.5	85.0
L9	OFF	70.2	5515.0	9875.0	19040.4	85.1
L10	OFF	61.5	5515.0	9400.5	20115.5	84.5

multiple solutions generation should therefore be used. A more pragmatic approach being to solve for a given set of selected technologies a sequence of minimum operating cost problems for different values of the electricity prices, each problem being solved independently for each of the considered periods.

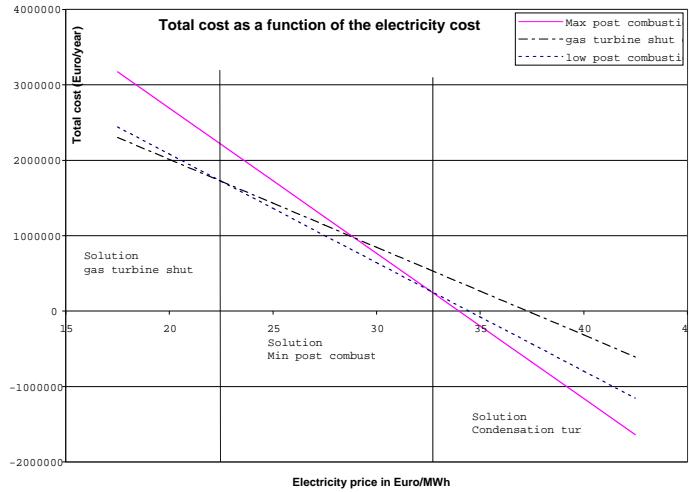


Fig. 6. Cost of the different solutions as a function of the electricity selling price, Natural gas price : 0,135 €/kg

6 Conclusion

A mixed integer linear programming formulation has been presented and applied to solve the optimal integration of the utility system of an industrial production site. The method developed addresses the problem of solving a multi-period optimisation problem that incorporates models for selecting and targeting the optimal operation strategy of the utility system including gas turbines, steam network and cooling system together with the calculation of the optimal heat recovery system. The identification of the operating periods has been made by using a genetic algorithm method that computes a set of simultaneous levels of utilisation for each of the processes under study. The gas turbine and combustion model has been developed to handle existing gas turbines available on the market. The model uses data from technology data bases, simulation to represent the partial load performances in each of the operating periods. The MILP model proposed allows to compute the optimal

flows to be considered in the integrated system and especially computing the optimal flows to be considered in the steam network and in the post combustion system.

7 Acknowledgments

This work has partly been performed at the University of Liège (BE) in the frame of a European project (JOE3-CT97-0070) partially funded by the European Commission.

References

- Leyland G., Multi-Objective Optimisation Applied to Industrial Energy Problems, PhD Thesis, LENI publications, in press (2002).
- Dumont MN., Maréchal F., Kalitventzeff B., Case Study Concerning the Opportunity of Installing Cogeneration System in an Existing Industrial Site, The First European Congress on Chemical Engineering, Firenze, (1997)
- Duran M. A. and Grossmann I.E. , Simultaneous optimization and heat integration of chemical processes. AIChE Journal, Vol. 32, n°1, (1986a)
- Floudas C.A., Grossmann I.E., Synthesis of flexible heat exchanger networks for multi period operation Computers and Chemical Engineering, Vol. 10, No 2, pp. 153-168, (1986)
- Floudas C.A., Grossmann I.E., Automatic generation of multiperiod heat exchanger network configuration Computers and Chemical Engineering, Vol. 11, No 2, pp. 123-142, (1987)
- Grossmann I.E., Santibanez J., Applications of mixed-integer linear programming in process synthesis, Computers and Chemical Engineering, Vol. 4, pp 205-214, (1980).
- Grossmann I. E. Mixed Integer programming approach for the synthesis of integrated process flowsheets, Computers and chemical engineering Vol 9., n°5, pp. 463-482, (1985).
- Kalitventzeff B., Marechal F., Optimal insertion of energy saving technologies in industrial processes : a web based tool helps in developments and coordination of a european R&D project. Applied Thermal Engineering, Vol. 20 (15-16), pp. 1347-1364, (2000)
- Maréchal F., Kalitventzeff B., SYNEP1 : a methodology for energy integration and optimal heat exchanger network synthesis. Computers and Chemical engineering, Vol. 13, No 4/5, pp. 603-610, (1989)
- Maréchal F., Kalitventzeff B. Identify the optimal pressure levels in steam networks using Integrated Combined Heat and Power method, Chemical Engineering Science Vol 52, N° 17, pp. 2977-2989, (1996)

- Marechal F., Kalitventzeff B., Process integration : Selection of the optimal utility system Computers and Chemical Engineering, Vol 22 Suppl., pp. S149-S156, (1998)
- Maréchal F., Kalitventzeff B., Energy integration of industrial sites : tools, methodology and applications. Applied Thermal Engineering, Vol. 18, pp. 921-933, (1998)
- Maréchal F., Kalitventzeff B., Targeting the optimal integration of steam networks Computers and Chemical Engineering, Vol. 23 Suppl., pp. S133-S136, (1999)
- Marechal F. , Kalitventzeff B. , A methodology for the optimal insertion of organic Rankine Cycles in the industrial processes. 2nd International Symposium on Process Integration, Halifax (2001)
- Marechal F., Kalitventzeff B., A tool for optimal synthesis of industrial refrigeration systems Computer-aided chemical engineering, Proceedings of ESCAPE-11, Vol. 9, pp. 457-463, (2001)
- Papoulias S.A., Grossmann I.E., A structural optimization approach in process synthesis - I. Utility systems, Computers and Chemical Engineering, Vol. 7, No 6, pp. 695-706 (1983)
- Townsend D.W., Linnhoff B. , Heat and power networks in process design. Part 1: Criteria for placement of heat engines and heat pumps in process networks. AIChE Journal, Vol. 29, n° 5, September 1983, pp. 742-748, (1983)

Annexe 4 page de téléchargement des fichiers PINCHLENI
pour le logiciel EXSYS

**Only available in the paper version for the electronic
version connect to the [web site](#)**

Annexe 5□ Tutorial d'application PINCHLENI

**Only available in the paper version for the electronic
version connect to the [web site](#)**

Annexe 6□ Tutorial d'application PINCHLENI-EXSYS

**Only available in the paper version for the electronic
version connect to the [web site](#)**

Annexe 7 ☐ Formulaire de description des erreurs et formulaire d'éditions pour les développeurs.



English only

[PINCHLENI - EXSYS Software](#)

Update bug : hot utility and already defined problems

Tutorial

[User Manual](#)
[Tutorial PINCHLENI](#)
[Tutorial EXSYS](#)
[Theory](#)

EXSYS

[Connect](#)
[Up load data](#)
[Manuals](#)

DATABASE

[Consult database](#)
[Attribute a password](#)
[Drop a member](#)

F.A.Q.

[Consult FAQ](#)
[Erase a FAQ](#)
[Add a new FAQ](#)
[Modify a FAQ](#)
[Add a new topic](#)
[Modify a topic](#)
[Erase a topic](#)

BUGS

[Consult bugs](#)
[Edit bugs](#)
[Modify bugs](#)
[Erase bugs](#)

NEWS

[Consult News](#)
[Erase a News](#)
[Add a News](#)

ADMIN.

[Admin. profil](#)

©2002 EPFL - [Contact](#)