



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Sciences pour l'Ingénieur*

Présentée et soutenue par *Adrien Gomez*
Le 8 décembre 2008

Titre : *Optimisation technico-économique multi-objectif de systèmes de conversion d'énergie: cogénération électricité-hydrogène à partir d'un réacteur nucléaire de IVème génération*

JURY

<i>M. Christophe GOURDON</i>	<i>Président</i>
<i>Mme. Catherine AZZARO-PANTEL</i>	<i>Directrice de thèse</i>
<i>M. Serge DOMENECH</i>	<i>Directeur de thèse</i>
<i>Mme. Lingai LUO-DONG</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Patrick SIARRY</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Christian LATGE</i>	<i>Membre</i>
<i>M. Patrick DUMAZ</i>	<i>Membre</i>
<i>Mlle. Christine MANSILLA</i>	<i>Membre Invité</i>
<i>M. David HAUBENSACK</i>	<i>Membre Invité</i>

Ecole doctorale : *Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés*
Unité de recherche : *Laboratoire de Génie Chimique*
Directeur(s) de Thèse : *Mme Catherine Azzaro-Pantel, M. Serge Domenech*
Rapporteurs : *Mme Lingai LUO-DONG, M. Patrick SIARRY*

A mes parents pour tout leur amour qui sera éternel
A ma grand-mère pour son infinie bonté
A ma famille
A mes amis

Une thèse est un moment particulier de la vie d'un chercheur, un moment de transition entre de longues études et la nécessaire prise d'expérience. C'est un moment où parfois s'entrechoquent pour la première fois l'idéalisme de la jeunesse et les réalités de notre monde, un moment de rencontres parfois difficiles, souvent magnifiques, mais toujours instructives.

Mes premiers mots sont pour ma Mère et mon Père. Ma Mère qui m'a tellement donné d'amour. Comment décrire une femme qui a voué sa vie à mon attention, à ma protection, qui m'a élevé sans jamais se préoccuper d'elle : il n'existe pas de mots pour décrire cela. Elle m'accompagne à chacun de mes pas car elle est partie de moi-même, et elle le restera jusqu'à la fin de mes jours, dans mon cœur comme dans ma mémoire. Mon Père qui s'est sacrifié toute sa vie, dans un des plus dur des métiers, pour nous donner les moyens de vivre une existence digne, en construisant sa propre maison, avec ma Mère, pour nous donner un toit qui nous a abrité. Je me souviens aujourd'hui de tous ces bons moments, avec mon fidèle chien, qui ne quitteront jamais. Ils resteront pour moi une époque dorée qui resteront dans mon cœur tant qu'il me restera un souffle de vie ! Merci pour votre soutien tout au long de ces trois difficiles années, m'encourageant lorsque j'en avais besoin, et en m'aidant de toutes vos forces surtout les derniers mois.

Ce travail de thèse a été réalisé simultanément au sein du CEA de Cadarache, dans le Laboratoire de Conception des Systèmes Innovants du Service d'Etude des Systèmes Innovants du Département d'Etude des Réacteurs, et dans l'équipe de Conception Optimisation et Ordonnancement des Procédés du département Procédés et Systèmes Industriel du Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse.

Je souhaite remercier le Professeur Luo et le Professeur Siarry pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse, et pour la pertinence de leurs commentaires.

Je souhaite remercier le Professeur Catherine Azzaro-Pantel, qui a acceptée de diriger ma thèse et qui a su tirer le meilleur de moi-même. Je me souviendrais toujours de sa bonne humeur, même dans les derniers moments de la rédaction, et pour son dévouement lors de cette dernière ligne droite sans lequel je n'aurais probablement pas fait autant de choses.

Comment ne pas remercier également le Professeur Serge Domenech, qui m'a fait l'honneur d'être également mon directeur de thèse, auprès de qui je l'espère avoir pu capter ne serait-ce que 0,001% de son savoir. Je n'oublierai jamais nos conférences à l'étranger : jamais de tels moments, d'ordinaire synonymes de stress, n'ont été plus divertissants.

Le Professeur Luc Pibouleau ne doit pas être oublié. La force de son esprit me semble inatteignable pour un jeune ingénieur. J'espère acquérir sa justesse d'esprit et sa maîtrise des mathématiques.

Je remercie Christian Latgé qui a toujours réussi à trouver le temps pour me donner ces conseils et contribuer à l'évolution de ces travaux. Sa vision globale des problématiques m'a souvent amené à percevoir des débouchés que je ne soupçonnais pas.

Merci également à Patrick Dumaz pour la qualité de nos échanges scientifiques et pour son appui significatif aux moments cruciaux. Même dans les derniers moments, il m'a apporté son point de vue malgré l'éloignement géographique.

Je remercie David Haubensack pour ces conseils et sa vision pragmatique, et qui a su me cadrer. Son travail m'a beaucoup inspiré dans mes propres développements. La justesse de son raisonnement restera pour moi une référence.

Merci à Nicolas Alpy qui s'est formidablement impliqué dans ma thèse et auprès de qui j'ai beaucoup appris.

Je voudrais également remercier l'ensemble du LCSi, et plus largement le SESI de Cadarache.

Je remercie également l'ensemble du LPC de Cadarache qui m'a soutenu lors des derniers mois.

Bien sûr comment ne pas citer mes collègues de bureau : Marie, Marianne, Jose Luis, Adama, Guillermo, Dan, Nadir, Oscar, Antonin, Sofiane. Petite Marie, toujours le sourire même quand ça va pas. Marianne, que je ne connais pas bien encore mais qui complète bien Marie. Jose Luis, le vétéran discret de l'équipe. Guillermo toujours de bonne humeur. Adama et ses crises de fous-rires. Enfin Dan, le petit dernier de l'équipe.

Merci à vous pour l'ambiance formidable et pour l'entraide qui a toujours fait notre force, mais qu'il faut savoir cultiver. Merci également à André Davin pour ses blagues.

Je salue également mon cher ami Joachim pour toutes ces années passées à l'ENSIACET et au LGC.

Bien sûr, j'ai une pensée pour le cercle : Laurent, Huberson, Julien. Ensembles nous avons vécu plus d'une péripétie.

Je salue également l'ensemble des doctorants et du personnel du LGC, pour ces trois années passées auprès de vous.

Titre

Optimisation technico-économique multiobjectif de systèmes de conversion d'énergie : cogénération électricité-hydrogène à partir d'un réacteur nucléaire de IV^{ème} génération.

Résumé

Face aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, telles que la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre, et face à l'épuisement annoncé des réserves d'énergies fossiles, l'hydrogène est perçu comme un vecteur énergétique prometteur. Un des principaux enjeux technologiques d'une future économie de l'hydrogène est sa production à grande échelle en se passant d'énergies fossiles émettrices de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le nucléaire est particulièrement intéressant pour produire massivement de l'hydrogène par cycles thermochimiques ou par électrolyse haute température. Un des systèmes nucléaires sélectionnés est le réacteur à très haute température (950°C/1200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité, VHTR (*Very High Temperature Reactor*).

L'objectif principal de ces travaux, dans le cadre d'une collaboration entre le CEA de Cadarache et le LGC consistait à définir une méthodologie d'optimisation technico-économique de tels systèmes de cogénération, pour identifier et proposer des stratégies prometteuses de développement. Parmi les procédés de production massive d'hydrogène à l'étude, le cycle thermochimique Iode-Soufre a été retenu. Compte tenu de la diversité des énergies exploitées (chaleur, électricité) et produites (hydrogène et électricité) du système de cogénération, une approche exergetique a été développée, particulièrement adaptée à la comparaison de différentes formes d'énergie. Dans ce but, le logiciel CYCLOP (CEA) a été utilisé et adapté pour la modélisation thermodynamique de ces systèmes.

Le critère économique, calculé à l'aide du logiciel SEMER (CEA), est basé sur la minimisation du coût total du site de production sur sa durée de vie impliquant l'investissement, les coûts d'exploitation et celui du combustible nucléaire. Le calcul d'investissement implique le développement de fonctions de coûts adaptées aux technologies et aux conditions de fonctionnement spécifiques.

Les études ont été menées pour maximiser la production d'énergie au niveau global, tout en minimisant les coûts de production. Ce problème bicritère a été résolu grâce au développement d'une bibliothèque modulaire et extensible d'algorithmes génétiques (MULTIGEN), basés sur l'algorithme NSGAIL. Plusieurs procédures y sont intégrées pour traiter des problèmes mono et multicritère en variables continues, entières et binaires. Les principales innovations ont porté sur la fiabilisation des algorithmes implantés, le traitement des contraintes et des variables de structure ainsi que l'implantation d'un critère d'arrêt basé sur la stagnation du front de Pareto.

Une méthodologie technico-économique multicritère générale a été appliquée à trois systèmes de conversion de chaleur produite par un réacteur VHTR : production d'électricité seule, cogénération électricité-hydrogène et, enfin, seule production d'hydrogène.

Parmi les résultats significatifs obtenus, on note que les sites dédiés exclusivement à la production d'hydrogène, ainsi que les sites de cogénération, présentent un coût de production comparable dans la zone de coût de production du réseau électrique français. Les sites de cogénération sont donc particulièrement intéressants du point de vue du coût hydrogène, mais le nombre de sites doit être multiplié, pour espérer un effet de série.

Cette méthodologie générique peut également s'appliquer à la production d'hydrogène par électrolyse à haute température, ou bien à d'autres cycles de production d'hydrogène existants, notamment les cycles hybrides.

Mots clé

Hydrogène, Cogénération, Electricité, Réacteur Nucléaire, Génération IV, Technico-économie, Optimisation, Algorithmes Génétiques

Title

Multiobjective technico-economic optimization of energy conversion systems: hydrogen and electricity cogeneration from IVth Generation nuclear reactor

Abstract

With the increase in environmental considerations, such as the control of greenhouse emissions, and with the decrease in the fossil energy resources, hydrogen is currently considered as a promising energy vector. One of the main technological challenges of a future hydrogen economy is its large scale production without fossil fuel emissions. Under this context, nuclear energy is particularly adapted for hydrogen massive production by thermochemical cycles or high temperature electrolysis. One of the selected nuclear systems is the Very High Temperature Reactor (950°C/1200°C), cooled with helium, and dedicated to hydrogen production or to hydrogen electricity cogeneration. The main objective of this investigation, within the framework of a collaboration between CEA, French Atomic Agency (Cadarache) and LGC (Toulouse), consists in defining a technico-economic optimization methodology of electricity-hydrogen cogeneration systems, in order to identify and propose promising development strategies. Among the massive production processes of hydrogen, the thermochemical cycle Iodine-Sulphur has been considered.

Taking into account the diversity of the used energies (i.e., heat and electricity) on the one hand and of the produced energies (hydrogen and electricity) on the other hand of the studied cogeneration system, an exergetic approach has been developed due to its ability to consider various energy forms on the same thermodynamical basis. The CYCLOP software tool (CEA) is used for the thermodynamic modelling of these systems.

The economic criterion, calculated using the SEMER software tool (CEA), is based on the minimization of the total production site cost over its lifespan i.e., investment, operating costs and nuclear fuel cost. Capital investment involves the development of cost functions adapted to specific technologies and their specific operating conditions.

The resulting optimization problems consist in maximizing the energy production, while minimizing the production costs, which constitutes a multicriteria problem, solved by the so-called MULTIGEN, i.e. a library of genetic algorithms designed with modular and extensible properties, based on the well-known NSGA II algorithm. Several procedures have been implemented, adapted to both mono and multicriteria problems case, to their type (structural optimization for example) and to nature of the considered variables (continuous, binary, integer or mixed). The main innovations related to the reliability of the algorithms involve the constraints treatment, the structural variables and the development of a stop criterion, based on the stagnation of the Pareto front.

A generic multicriteria technico-economic methodology was applied to three conversion systems by a VHTR reactor: electrical production, electricity/hydrogen cogeneration and, finally, hydrogen production. Among the most significant results, it can be highlighted that exclusively dedicated hydrogen production sites are comparable with cogeneration sites from production costs point of view, within the range of french electrical network production costs. The cogeneration sites exhibit an increased economic interest from hydrogen cost point of view, but the number of sites will have to be multiplied, so that a series effect is observed.

This methodology is still valid for the production of hydrogen by high temperature electrolysis, or by other existing production cycles of hydrogen, in particular hybrid cycles.

Keywords

Hydrogen, Cogeneration, Electricity, Nuclear Reactor, Generation IV, Technico-economics, Optimization, Genetics Algorithm

Sommaire Général

	Page
INTRODUCTION ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE.....	13
<u>Chapitre I - Problématique de la cogénération électricité-hydrogène</u>	
1.1 – DESCRIPTION DES SYSTEMES A ETUDIER ET OUTILS DISPONIBLES.....	20
1.1.1 – DEFINITION DES SYSTEMES A ETUDIER.....	20
1.1.1.1 – Les réacteurs de IV ^{ème} génération.....	20
1.1.1.2 – Les cycles électrogènes de IV ^{ème} génération.....	21
1.1.1.3 – Les procédés de production massive d’hydrogène.....	21
1.1.2 – DESCRIPTION DU SYSTEME DE COGENERATION RETENU.....	23
1.1.2.1 – Turbomachine électrogène.....	24
1.1.2.2 – Échangeur Intermédiaire.....	25
1.1.2.3 – Boucle de distribution de chaleur.....	26
1.1.3 – OUTILS DISPONIBLES POUR LES ETUDES TECHNICO-ECONOMIQUES.....	27
1.1.3.1 – Simulation des systèmes CYCLOP/COPERNIC.....	27
1.1.3.2 – Évaluation économique des systèmes.....	28
1.3 – CHOIX DES CRITERES D’OPTIMISATION	28
1.3.1 – CHOIX D’UN CRITERE ECONOMIQUE.....	28
1.3.2 – CHOIX D’UN CRITERE ENERGETIQUE.....	29
1.4 – DEMARCHE ADOPTEE.....	30
<u>Chapitre II - Stratégie d'optimisation multicritère par algorithmes génétiques</u>	
2.1 - INTRODUCTION.....	34
2.2 – ALGORITHMES ET METHODES MULTIOBJECTIF : ETAT DE L’ART POUR LES PROBLEMES EN VARIABLES MIXTES	34
2.2.1 – NOTIONS GENERALES SUR L’OPTIMISATION MULTIOBJECTIF.....	34
2.2.2 – APPROCHE D’OPTIMISATION RETENUE : ALGORITHMES GENETIQUES.....	36
2.2.2.1 – Principe des algorithmes génétiques.....	36
2.2.2.2 – Développements algorithmiques en variables continues.....	37
2.2.2.3 – Développements sur les algorithmes génétiques en variables mixtes.....	38
2.2.2.4 – Conclusion et choix d’algorithmes.....	39
2.2.3 – ANALYSE DE NSGA II ET DEVELOPPEMENTS NECESSAIRES POUR MULTIGEN.....	40
2.2.3.1 – Description de NSGA II.....	40
2.2.3.2 – Bilan des développements nécessaires pour MULTIGEN.....	42
2.3 – DEVELOPPEMENT ALGORITHMIQUES SOUS MULTIGEN.....	43
2.3.1 – DEVELOPPEMENT DE PROCEDURES	43
2.3.1.1 – Codage des individus et des populations.....	43
2.3.1.2 – Croisement et mutation pour les variables entières-binaires.....	43
2.3.1.3 – Croisement et mutation pour les problèmes de structure.....	44
2.3.1.4 – Gestion des clones.....	46
2.3.1.5 – Calcul du degré de violation des contraintes.....	46
2.3.1.6 – Modification de la règle de domination sous contraintes.....	46
2.3.1.7 – Critère d’arrêt.....	47
2.3.1.8 – Option d’initialisation des populations.....	49
2.3.1.9 – Développement d’une interface sous Excel.....	50

2.3.2 – DEVELOPPEMENT D’ALGORITHMES D’OPTIMISATION.....	51
2.3.2.1 – Algorithmes d’optimisation en variables continues.....	51
2.3.2.1.1 – Description des algorithmes	51
2.3.2.1.2 – Exemple de problème en variables continues	52
2.3.2.2 – Développement d’algorithmes en variables continues, entières et binaires.....	53
2.3.2.2.1 – Description des algorithmes	53
2.3.2.2.2 – Exemple de problème en variables mixtes continue et binaire	54
2.3.2.3 – Développement d’un algorithme structurel : MIB MOGA.....	55
2.3.2.3.1 – Description des algorithmes	55
2.3.2.3.2 – Exemple de problème d’optimisation de structure.....	58
2.3.2.4 – Récapitulatif du contenu de la bibliothèque MULTIGEN.....	62
2.4 – COUPLAGE MULTIGEN – OUTILS CEA	62
2.4.1 – OBJECTIFS GENERAUX DE COUPLAGE DES OUTILS	62
2.4.2 – APPLICATION A UN CAS SIMPLE : OPTIMISATION D’UNE TURBOMACHINE ELECTROGENE.	64
2.4.2.1 – Description du problème.....	64
2.4.2.2 – Résultat de l’optimisation.....	66
2.5 – CONCLUSION.....	68
 <u>Chapitre III - Analyse exergetique pour les systèmes de cogénération</u>	
3.1 – INTRODUCTION A LA PROBLEMATIQUE	72
3.2 - MODELISATION DE LA DESTRUCTION D’EXERGIE SUR LES COMPOSANTS.....	73
3.2.1 – INTRODUCTION A LA THEORIE DE L’EXERGIE	73
3.2.2 – BILAN EXERGETIQUE D’UN SYSTEME SANS REACTION CHIMIQUE.....	74
3.2.3 – L’EXERGIE COMME QUANTIFICATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE D’UN SYSTEME : ECHANGES A L’INTERFACE SYSTEME – SOURCE FROIDE	76
3.2.3.1 Cas d’un refroidisseur dont la source froide n’est pas en équilibre avec l’atmosphère.....	76
3.2.3.2 – Prise en compte des pertes thermiques par le concept d’exergie	78
3.2.4 – MODELISATION D’UN SYSTEME FOURNISSANT DE LA CHALEUR : EXPRESSION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DU SYSTEME.....	79
3.2.4.1 – Formulation générale et hypothèses	79
3.2.4.2 – Expression de la température entropique : cas général	80
3.2.5 – NOTION DE RENDEMENT EXERGETIQUE	81
3.2.6 – PRISE EN COMPTE DU POTENTIEL ENERGETIQUE DE L’HYDROGENE.....	81
3.2.6.1 – Définition du pouvoir exergetique d’un combustible carboné.....	82
3.2.6.2 – Pouvoir exergetique de l’hydrogène	83
3.3 – PERTES/DESTRUCTIONS EXERGETIQUES POUR LA PRODUCTION D’HYDROGENE : APPLICATION A UNE USINE IODE-SOUFRE.....	83
3.3.3 – PRODUCTION D’HYDROGENE DE L’USINE	83
3.3.4 – CONCLUSION : PERTES ET RENDEMENT EXERGETIQUES DU CYCLE IODE - SOUFRE.....	84
3.4 - CONCLUSION	84

Chapitre IV - Optimisation exergetique de la production d'électricité, chaleur et hydrogène

4.1 - INTRODUCTION.....	88
4.2 – FORMULATION DU CRITERE ENERGETIQUE	88
4.2.1 – MODELE GENERALISE DE DESTRUCTION D'EXERGIE	88
4.2.1.1 – Irréversibilités internes sur un composant.....	88
4.2.1.2 – Expression générale du critère d'optimisation des pertes/destructions d'exergie et application pratique au sein de CYCLOP	90
4.2.1.3 – Pertes/destructions exergetiques sur les objets « Transfert ».....	91
4.2.2 – METHODE D'IDENTIFICATION DES PERTES/DESTRUCTIONS EXERGETIQUES : CRITERE D'OPTIMISATION FINAL A PARTIR DU CALCUL AUTOMATIQUE PAR CYCLOP	91
4.3 – APPLICATION DU CRITERE D'OPTIMISATION	92
4.3.1 – CYCLES ELECTROGENES	92
4.3.1.1 – Cycle direct He type GT-MHR.....	93
4.3.1.1.1 – Description du cycle et optimisation.....	93
4.3.1.1.2 – Sensibilité du critère d'optimisation à l'efficacité des composants	95
4.3.1.1.3 – Conclusions sur l'étude de sensibilité	99
4.3.1.2 – Cycle direct He/He-N ₂ /H ₂ O	100
4.3.2 – PRODUCTION D'ENERGIE : ELECTRICITE – CHALEUR - HYDROGENE	104
4.3.2.1 – Comparaison des boucles de distribution de chaleur, pour le cycle Iode-Soufre par l'approche exergetique	104
4.3.2.2 – Cogénération électricité – chaleur.....	105
4.3.2.3 – Cogénération électricité – hydrogène produit par le cycle Iode-Soufre.....	108
4.3.3 – CONCLUSIONS SUR L'APPLICATION DU CRITERE	108
4.4 – CONCLUSION GENERALE	109

Chapitre V - Analyse technico-économique des systèmes énergétiques

5.1 – INTRODUCTION.....	114
5.2 – TECHNICO-ECONOMIE DES SYSTEMES ETUDIES	115
5.2.1 – DONNEES ECONOMIQUES DISPONIBLES : ETAT DES LIEUX	115
5.2.1.1 – Introduction.....	115
5.2.1.2 – Estimation du coût de production du « Power Conversion System »	115
5.2.1.3 – Tendence d'évolution des coûts pour un cycle direct couplé à un réacteur à haute température	116
5.2.1.4 – Estimation des coûts pour les échangeurs plaques-ailettes en aluminium.....	117
5.2.1.5 – Coût du combustible.....	118
5.2.2 – DECOMPOSITION DES COUTS D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE AVEC LE CODE SEMER.....	118
5.2.2.1 – Présentation générale de SEMER.....	118
5.2.2.2 – Présentation d'un modèle global SEMER.....	119
5.2.3 – DEVELOPPEMENTS NECESSAIRES	120
5.3 – ÉVALUATION DES COUTS DES COMPOSANTS	122
5.3.1 – INTRODUCTION A LA METHODOLOGIE	122
5.3.2 – MODELE DE COUT POUR LA TURBOMACHINE ELECTROGENE	123
5.3.3 – USINES DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR LE CYCLE IODE-SOUFRE.....	124
5.3.3.1 – Investissement de l'usine.....	124
5.3.3.2 – Coût de fonctionnement.....	125

5.3.4 – CONDUITES DE TRANSPORT D’HELIUM.....	125
5.3.5 – RECAPITULATIF DES FONCTIONS DE COUT DEVELOPPEES	126
5.4 – EXPRESSION DU CRITERE D’OPTIMISATION ECONOMIQUE FINAL.....	127
5.4.1 – OBJECTIFS GENERAUX	127
5.4.2 – MODIFICATIONS DU MODELE GT-MHR : ADAPTATION A LA COGENERATION.....	127
5.5 - CONCLUSIONS	129

Chapitre VI - Optimisation multicritère des systèmes énergétiques : étude de scénarii et résultats

6.1 - INTRODUCTION.....	132
6.2 – METHODOLOGIE D’OPTIMISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES SYSTEMES DE COGENERATION.....	132
6.3 – APPLICATION DE LA METHODOLOGIE AU COUPLAGE D’UN CYCLE ELECTROGENE AVEC LA PRODUCTION D’HYDROGENE PAR LE CYCLE IODE-SOUFRE	135
6.3.1 – SCENARIO ECONOMIQUE RETENU.....	136
6.3.2 – OPTIMISATION D’UN SITE DE VHTR 100% DEDIES ELECTRICITE	136
6.3.2.1 – Description du système.....	136
6.3.2.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système et analyse de sensibilité des variable.....	137
6.3.2.2.1 – Analyse de sensibilité des variables	137
6.3.2.2.2 – Optimisation avec les variables d’optimisation retenues	139
6.3.2.3 – Phase 2 : calcul du coût de production de l’électricité.....	141
6.3.2.4 – Analyse des résultats	142
6.3.3 – OPTIMISATION D’UN SITE DE VHTR EN COGENERATION ELECTRICITE HYDROGENE	143
6.3.3.1 – Description du système.....	143
6.3.3.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système	144
6.3.3.3 - Phase 2 : calcul du coût de production de l’hydrogène en €/kg (équivalent Pouvoir Exergétique)	146
6.3.3.4 – Phase 3 : fixation du prix de vente de l’électricité.....	147
6.3.3.5 – Effet de série de la construction des sites sur le coût de l’hydrogène	149
6.3.4 – OPTIMISATION D’UN SITE DE VHTR 100% DEDIE A L’HYDROGENE.....	150
6.3.4.1 – Description du système et hypothèses	150
6.3.4.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système	151
6.3.4.3 – Phase 2 : calcul du coût de production de l’hydrogène en €/kg.....	151
6.3.4.4 – Répartition des coûts et analyse des résultats.....	152
6.4 - CONCLUSIONS	154
CONCLUSION GENERALES ET PERSPECTIVES.....	158

Annexes

Croisement et mutation pour les variables continues	180
Décomposition du coût de la turbomachine [FOU05]	183

Introduction Générale

Introduction et présentation de la problématique

L'opinion publique et les gouvernements admettent aujourd'hui qu'il est nécessaire de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, la grande dépendance des économies aux combustibles fossiles (voir figure 1), émetteurs de CO₂, et la forte consommation énergétique, alliée à l'épuisement des réserves, font qu'il est impératif de rechercher de nouvelles sources d'énergie. En 2003, 10513 millions de tonnes de CO₂, en grande majorité d'origine fossile, ont été émis dans le monde (figure 2), qui s'ajoutent au capital du cycle naturel du carbone.

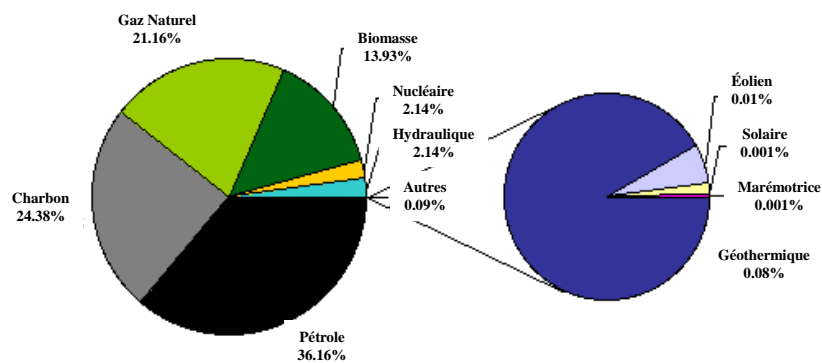


Figure 1 - Répartition de la consommation des sources d'énergie.
Emissions mondiales de CO₂ (Mega Tonnes)

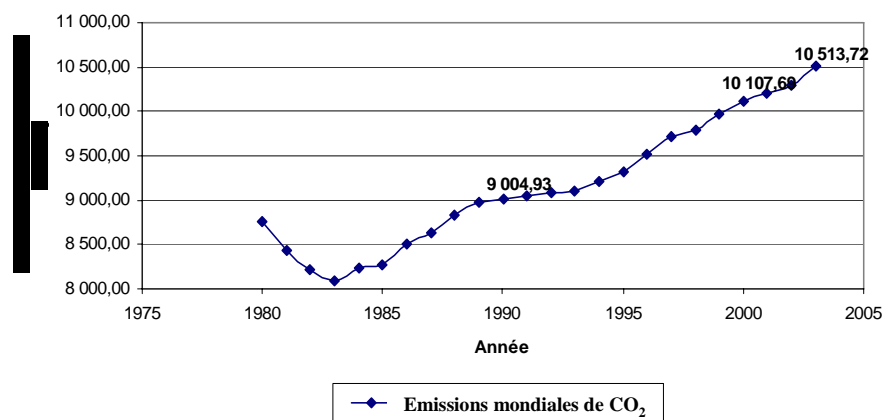


Figure 2 - Émissions mondiales de CO₂ de 1980 à 2003.

Parmi les nouvelles formes d'énergie envisageables, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique prometteur à cause de la multiplicité de son utilisation et des modes de production. Il sert directement comme combustible dans les lanceurs spatiaux ou dans l'industrie chimique comme gaz de synthèse. Le principal problème posé par l'hydrogène est son stockage et sa mise à disposition (étanchéité et mise en pression pour augmenter la quantité embarquée).

Actuellement, la cryogénisation et la mise sous pression sont fortement contraignantes pour une plus large utilisation de l'hydrogène. Des voies indirectes de stockage, telles que les

hydrures métalliques (complexes hautement enrichis en hydrogène pouvant libérer du H₂ par réaction de décomposition) permettent de s'affranchir des conditions physiques contraignantes décrites auparavant et connaissent un développement technologique fort avec des applications concrètes.

Cependant, il reste aussi à résoudre la question cruciale du mode de production de l'hydrogène moléculaire. Le principal procédé actuel consiste en un craquage du méthane issu du gaz naturel, donc émetteur de CO₂.

Comme le montre la figure 3, la première étape consiste à piéger le CO₂ mais d'autres voies, telles que les énergies renouvelables (décomposition de la biomasse) sont explorées. Enfin la voie la plus prometteuse se base sur la décomposition de la molécule d'eau elle-même : aucun gaz à effet de serre ne sera émis par un tel procédé si l'énergie apportée n'est pas une énergie fossile. Les voies possibles de décomposition de l'eau sont également diverses également.

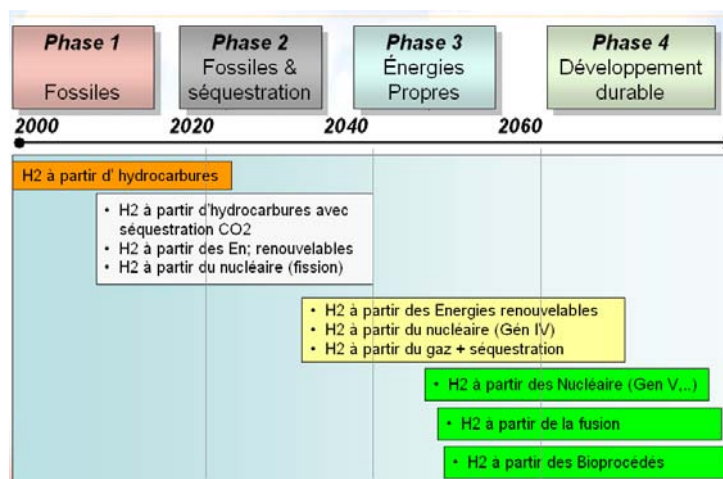


Figure 3 - Positionnement des procédés de production massive d'hydrogène.

Deux grandes familles de procédés de décomposition de l'eau sont à l'étude, notamment au CEA et dans le monde : l'Electrolyse à Haute Température (EHT) et les cycles thermochimiques, tels que le cycle Iode-Soufre. Les hautes températures exigées pour chacun de ces procédés font que les réacteurs nucléaires à haute température de nouvelle génération (VHTR = *Very High Temperature Reactor*) permettent la production massive d'hydrogène sans émission de CO₂. La production simultanée d'électricité doit être étudiée, en terme de couplage mais surtout d'un point de vue économique.

L'objectif général de la thèse est de développer une méthodologie d'optimisation technico-économique de systèmes de cogénération électricité / hydrogène, avec un réacteur nucléaire de IV^{ème} génération. Il s'agit de concevoir, de façon optimale des cycles électrogènes et des systèmes de distribution de chaleur pour maximiser la production d'énergie au niveau global, tout en minimisant les coûts de production, ce qui constitue une problématique multicritère.

Le réacteur nucléaire retenu pour les études technico-économiques doit fournir de la chaleur à une température de sortie élevée (950°C), ce qui le destine particulièrement à la fourniture de chaleur pour la production d'hydrogène, afin de satisfaire un optimum à définir (économique, thermodynamique, ...). Plusieurs cycles électrogènes sont envisagés : citons notamment les cycles directs de type Brayton ou combinés Brayton-Rankine (eau). La description de ces cycles doit faire apparaître les degrés de liberté nécessaires qui deviendront, pour certains, des variables d'optimisation.

La transmission globale de l'énergie dans le système est représentée sur la figure 4 : elle met en évidence les contraintes de fonctionnement induites par les demandes internes d'électricité et de chaleur. Chaque système présente des pertes et les dégradations d'énergie qu'il convient de réduire. De plus, chacun doit faire l'objet d'une modélisation thermodynamique et économique afin de mesurer l'impact du rendement sur le coût de production.

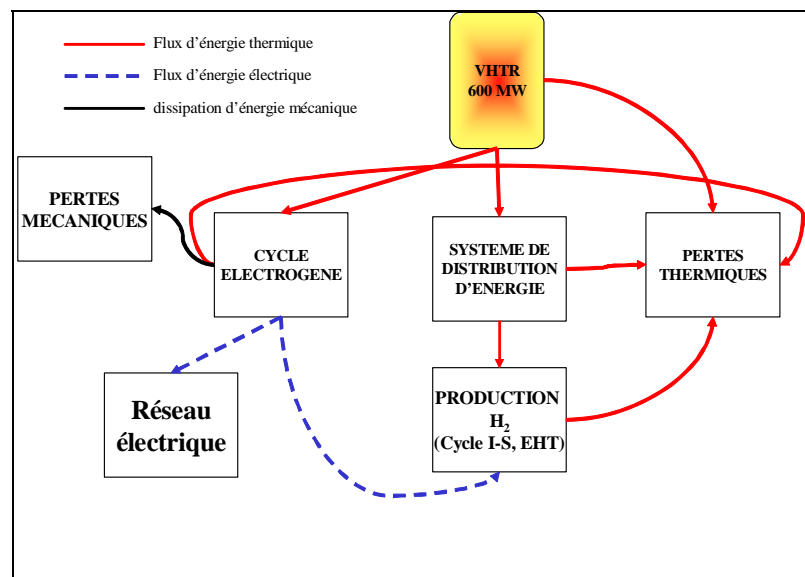


Figure 4 - Distribution de l'énergie produite par un HTR dans le cadre de la cogénération e⁻ / H₂.

Cette problématique nécessite des compétences dans le domaine nucléaire. Elles sont rassemblées dans le cadre de cette étude à travers le Département d'Étude des Réacteur (DER) du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA).

Le **Service d'Études des Systèmes Innovants** (SESI) de Cadarache regroupe des compétences pluridisciplinaires dans les domaines suivants : thermohydraulique, sûreté,

mécanique, économie, matériaux, approches probabilistes, conduite, contrôle-commande et facteur humain.

Sur la base de ces compétences, le SESI :

- propose des systèmes nucléaires pour le futur (combustible, réacteur, cycle, couplage à des procédés industriels) et en réalise la conception préliminaire,
- produit des évaluations sur tout ou partie de systèmes nucléaires en termes de performances, de sûreté, d'économie et d'utilisation des matières,
- développe et applique aux installations actuelles ou futures des méthodes liées aux approches probabilistes (traitement des incertitudes, fiabilité des systèmes et sûreté de fonctionnement).

Pour ces missions, le SESI s'appuie également sur les compétences d'unités plus spécialisées du CEA : autres services du DER, autres départements de la DEN (Département d'Étude Nucléaire), des collaborations internationales, en particulier dans le cadre du forum international Génération IV. Des outils spécifiques, développés au LCSi, sont utilisés dans le cadre de l'étude : CYCLOP pour la simulation thermodynamique des cycles électrogènes, COPERNIC pour le prédimensionnement des composants et, enfin, SEMER, pour l'évaluation des coûts des centrales nucléaires.

Un point majeur de ce travail est consacré au développement d'une méthode d'optimisation multicritère robuste : l'objectif est de maximiser le rendement du système de conversion d'énergie, tout en minimisant son coût. Le **Laboratoire de Génie de Chimique (LGC) de Toulouse** (CNRS UMR 5503), et plus particulièrement l'équipe de **Conception, Optimisation et Ordonnancement des Procédés (COOP)** du département **Procédés et Systèmes Industriels**

Le thème général de recherche de l'équipe COOP concerne l'optimisation et la conception de procédés, et dans ce cadre émerge de façon importante la classe des problèmes mixtes, qui contiennent des variables continues (conditions opératoires) et des variables entières (structure du procédé) voire des variables de décision. La démarche s'inscrit ainsi de façon prépondérante dans le développement de stratégies d'optimisation en variables mixtes, impliquant ou associant des méthodes stochastiques ou déterministes. Une orientation récente se positionne fortement vers les méthodes d'optimisation multicritère. Les concepts développés trouvent toute leur utilité dans des thématiques majeures : conception optimale de procédés continus et de réseaux complexes, conception intégrée d'unités discontinues et ordonnancement d'ateliers. Une attention particulière sera apportée ici au choix des critères technico-économiques adaptés aux problèmes de cogénération.

Ces travaux de thèse ont fait l'objet d'une collaboration entre le SESI du CEA de Cadarache et le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse.

Les travaux présentés dans cette thèse ont conduit aux publications suivantes :

- A. Gomez , C. Azzaro-Pantel , L. Pibouleau, S. Domenech, C. Latgé , P. Dumaz , D. Haubensack, *Optimisation of electricity / hydrogen cogeneration from Generation IV nuclear energy systems*, **17th European symposium on Computer Aided Process Engineering**, 27 – 29 mai 2007, Bucharest, Roumanie, **Communication Orale**
- A. Gomez , C. Azzaro-Pantel , L. Pibouleau, S. Domenech, C. Latgé , P. Dumaz , D. Haubensack, *Optimisation de la cogénération électricité/hydrogène de système de IV^{ème} génération*, **11^{ème} congrès de la Société Française de Génie des Procédés**, 9 – 11 Octobre 2007, St Etienne, **Communication Orale**
- A. Gomez, S. Domenech, C. Azzaro-Pantel, L. Pibouleau, *MULTIGEN: procédures d'optimisation multicritères*, **76^{ème} Congrès de l'Association Francophone pour le Savoir (ACFAS)**, 5 - 9 mai 2008, Montréal (Quebec), Canada, **Communication par affiche**
- A. Gomez , C. Azzaro-Pantel , L. Pibouleau, S. Domenech, *Teaching Mono and Multi-objective Genetic Algorithms in Process Systems Engineering: an illustration with the MULTIGEN environment*, **18th European symposium on Computer Aided Process Engineering**, 1 – 4 juin 2008, Lyon, France, **Communication par affiche**
- A. Gomez , C. Azzaro-Pantel , L. Pibouleau, S. Domenech, C. Latgé , D. Haubensack, *MULTIGEN A Genetic Algorithm Library for Techno-economic Optimization of Electricity Production from Generation IV Nuclear Technology*, **Computer & Industrial Engineering**, en cours de correction pour publication.
- T. Gilardi, A. Gomez , G. Rodriguez, *Estimation des coûts d'investissement d'une usine de production d'hydrogène par le cycle thermochimique Iode/Soufre*, **Note Technique CEA**, 2006.
- A. Gomez, *Recherches sur un critère d'optimisation énergétique adapté à l'optimisation technico-économique des systèmes de cogénération d'électricité et d'hydrogène de IV^{ème} génération*, **Note Technique CEA**, 2007.
- A. Gomez, *Optimisation technico-économique multiobjectif de systèmes de conversion d'énergie : Cogénération électricité-hydrogène à partir d'un réacteur de IV^{ème} génération*. **Note Technique CEA**, 2008.

CHAPITRE I

Problématique de la cogénération électricité - hydrogène

1.1 – Description des systèmes à étudier et outils disponibles

1.1.1 – Définition des systèmes à étudier

Les systèmes de cogénération d'électricité et d'hydrogène nécessitent une source chaude (réacteur nucléaire) adaptée aux procédés de production d'électricité et d'hydrogène. Plusieurs systèmes peuvent être envisagés pour chacune de ces fonctions.

1.1.1.1 – Les réacteurs de IV^{ème} génération

Parmi les réacteurs de IV^{ème} génération actuellement à l'étude (voir figure I-1), le *Very High Temperature Reactor* (VHTR) est un réacteur de IV^{ème} génération ayant pour objectif de produire de la chaleur à haute température. Cette chaleur peut être destinée à la production d'hydrogène par décomposition de l'eau et à la production électrique de rendement élevé.

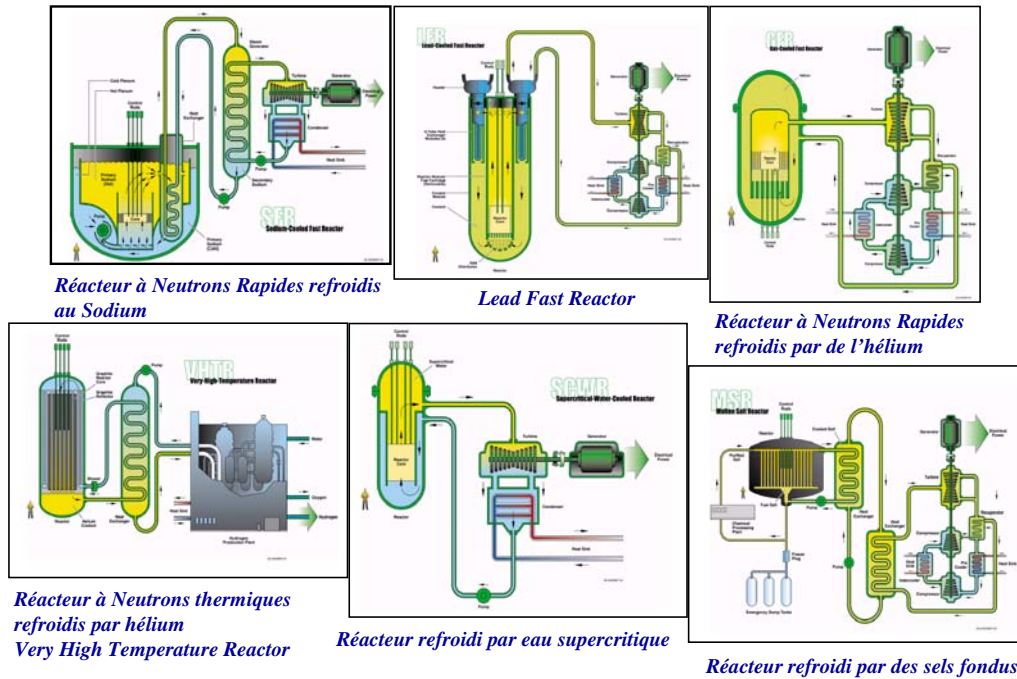


Figure I-1 – Réacteurs de IV^{ème} génération.

D'un point de vue thermodynamique, le réacteur est considéré comme une source chaude de 600 MW thermique et une température de sortie de 950 °C. La pression maximale de l'hélium est de 70 bar. Il est à noter que l'augmentation de la pression va induire une augmentation du coût des composants, mais également du rendement global. Dans ce cas, un compromis est donc possible : les modèles de coût développés devront être sensibles à la pression en sortie du réacteur.

1.1.1.2 – Les cycles électrogènes de IV^{ème} génération

Il existe deux catégories de cycles électrogènes. Les cycles directs utilisent directement le caloporteur du réacteur dans le système de conversion d'énergie. Dans le cas envisagé, le caloporteur utilisé est l'hélium, aussi le cycle thermodynamique utilisé est basé sur le cycle de Brayton (figure I-2). Ce type de cycle sera retenu pour les études présentées dans ce mémoire. Ce type de cycle a fait l'objet de nombreuses études technico-économiques, ce qui permet d'être confiant dans son évaluation économique.

Les cycles indirects (conversion d'énergie indépendante du caloporteur du réacteur) sont également susceptibles de pouvoir être utilisés (voir figure I-3). Ce type de cycle est proposé par AREVA dans le cadre de son programme de développement ANTARES (*AREVA New Technology based on Advanced Gas cooled Reactor for Energy Supply*).

Pour ce type de cycle, les données économiques et techniques sont insuffisantes pour pouvoir illustrer une quelconque démarche d'optimisation.

Le cycle direct est donc finalement retenu.

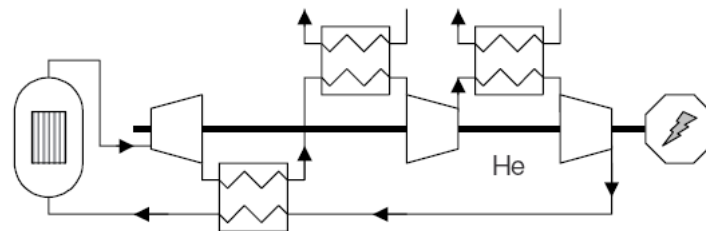


Figure I-2 – Schéma de cycle direct retenu.

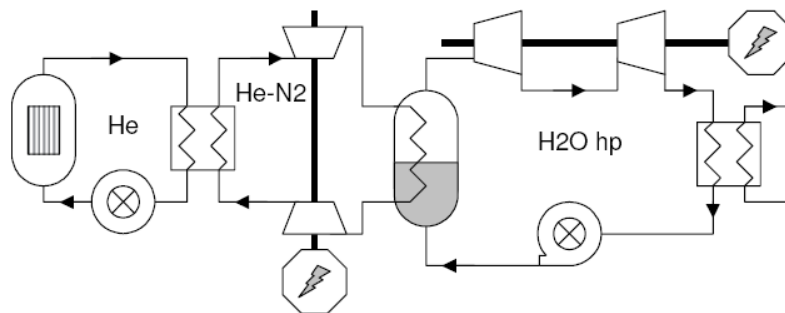


Figure I-3 – Schéma de cycle indirect.

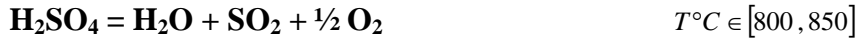
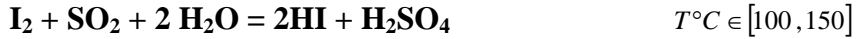
1.1.1.3 – Les procédés de production massive d'hydrogène

Les moyens de production d'hydrogène se divisent en deux grandes familles : les procédés thermochimiques et les procédés d'électrolyse.

Les procédés thermochimiques consistent à décomposer l'eau grâce à un jeu de réactions chimiques dont le bilan global aboutit à la décomposition de la molécule d'eau. Ces procédés nécessitent de la chaleur à une température supérieure à 900 °C, ce qui les rend compatibles

avec les conditions de fonctionnement du VHTR (voir §1.2.1.1). Le cycle Iode-Soufre (voir figure I-4) est actuellement le procédé thermo-chimique le plus avancé au CEA : son rendement, sa production (100 mol/s) et son coût d'investissement ont été évalués [GIL06, GIL07]. Ce dimensionnement servira de base pour toute l'étude.

Le cycle Iode-Soufre (figure I-8) est basé sur les trois réactions suivantes :



Les deux dernières réactions nécessitent de la chaleur à haute température, pouvant être fournie par une source solaire ou nucléaire.

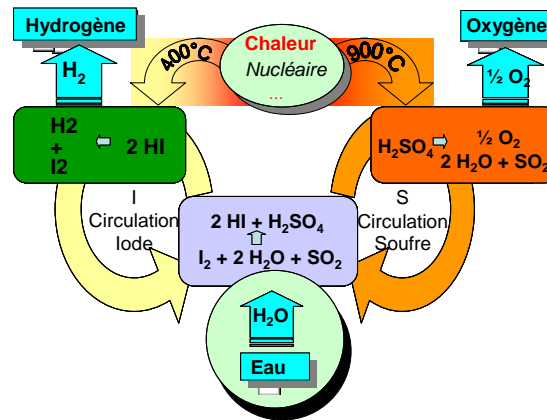


Figure I-4 – Schéma de principe du cycle Iode-Soufre

L'électrolyse à haute température est un autre système de production massive d'hydrogène à l'étude. La réaction thermodynamique globale dans ce cas de décomposition de l'eau est la suivante :



L'énergie minimale qu'il est nécessaire de fournir pour la dissociation des molécules d'eau prise à l'état liquide est de 286 kJ/mole.

Une décomposition directe est en théorie envisageable par apport d'énergie thermique, cependant la réaction n'est réellement irréversible qu'au-dessus de 3000 K, ce qui la rend difficilement envisageable industriellement, tant au niveau de la source de chaleur nécessaire que des matériaux compatibles avec de telles températures.

Il est possible d'effectuer cette décomposition à température moins élevée mais alors, l'énergie nécessaire, représentée par une variation d'enthalpie ΔH , est apportée non seulement sous forme thermique (exprimée par $T\Delta S$: température absolue x variation d'entropie) mais

également sous forme électrique ou mécanique (exprimée par la variation de l'enthalpie libre : ΔG)

Par rapport à l'électrolyse traditionnelle réalisée à basse température, l'électrolyse haute température (700 à 1000 °C) présente deux avantages :

- la part d'énergie thermique augmente linéairement avec la température quand la part d'enthalpie libre (donc d'énergie électrique) diminue,
- les pertes ohmiques à l'électrolyseur, principalement liées à des phénomènes de surtension, diminuent quand la température augmente. Ces pertes deviennent négligeables au delà de 700 °C.

L'équilibre thermodynamique du système est atteint en fournissant de la chaleur à la vapeur d'eau qui subit la transformation chimique induite par la fourniture d'électricité. Le niveau de température influe directement sur le rendement de l'électrolyse. Contrairement au cycle Iode-Soufre, les études technico-économiques n'ont pas le même degré d'avancement.

Le cycle Iode-Soufre est donc le seul système pouvant être utilisé à ce jour pour illustrer la méthodologie d'optimisation proposée. L'étude sera donc basée sur ce cas mais sera suffisamment générique pour s'adapter à d'autres systèmes de production d'électricité ou d'hydrogène.

1.1.2 – Description du système de cogénération retenu

Le système de cogénération (voir figure I-5) consiste à coupler un réacteur VHTR à un cycle électrogène en cycle direct. Une partie de la chaleur produite est destinée aux usines de production d'hydrogène : l'échangeur de chaleur intermédiaire permet de transmettre la chaleur issue du circuit primaire vers le circuit de distribution de chaleur. La distribution de chaleur nécessite des tuyauteries de transport adaptées aux hautes températures. Les usines de production d'hydrogène ont des demandes énergétiques et une capacité de production fixées.

Dans la suite de ce paragraphe, les données techniques nécessaires pour établir de nouvelles fonctions de coût sont fournies pour les composants suivants :

- la turbomachine électrogène (*PCS : Power Conversion System*),
- l'échangeur de chaleur intermédiaire (*IHX : Intermediate Heat Exchanger*),
- la boucle de distribution de chaleur.

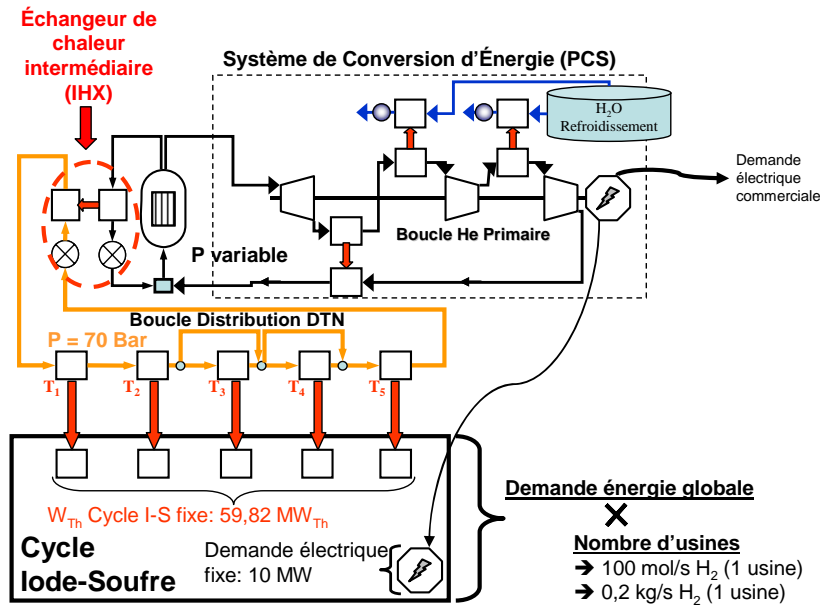


Figure I-5 – Schéma du système de cogénération étudié

1.1.2.1 – Turbomachine électrogène

Le concept GT-MHR, pour *Gas Turbine-Modular Helium Reactor* [GA96] [OKBM98], consiste à coupler un réacteur à haute température (850 °C), utilisant l'hélium comme caloporteur avec un cycle de conversion (turbomachine). Le cycle de conversion d'énergie est basé sur un cycle de Brayton. Cette turbomachine, ou *Power Conversion System* (PCS, voir figure I-6) reçoit 600 MW thermiques du réacteur et produit 286 MW d'électricité, avec un rendement de 47,7%.

Les composants majeurs du PCS sont les suivants :

- une turbomachine, consistant en un turbocompresseur (une turbine axiale et de deux sections de compresseurs axiaux) et un générateur électrique,
- un récupérateur de chaleur destiné à réchauffer l'hélium en sortie des compresseurs,
- des échangeurs refroidisseurs : un pré refroidisseur (*precooler*) et un refroidisseur intermédiaire (*intercooler*),
- conteneurs, tuyauterie interne et paliers.

Les conditions de fonctionnement (hautes températures, hautes pressions) nécessitent des matériaux spécifiques comme le Titane et l'Inconel, extrêmement coûteux. Dans cette étude, le récupérateur de chaleur et les refroidisseurs seront réalisés grâce à la technologie des échangeurs plaques-ailettes. Cette turbomachine sera adaptée à la température de sortie du VHTR (950 °C) plus élevée que celle de son concept initial (GT-MHR).

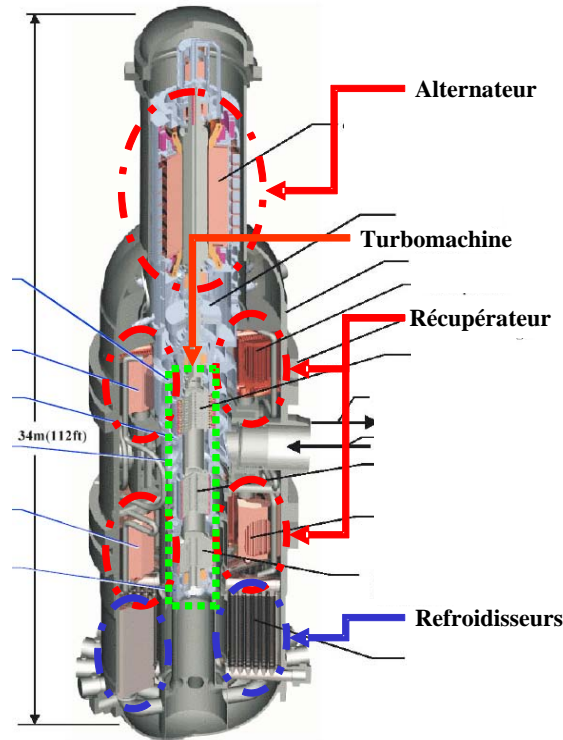


Figure I-6 – Coupe schématique de la turbomachine électrogène

1.1.2.2 – Échangeur Intermédiaire

L'échangeur de chaleur intermédiaire, noté IHX (voir figure I-7) est un élément sensible (proximité au réacteur). Il fonctionne à une température bien supérieure à celle du récupérateur de la turbomachine électrogène. Il doit également jouer le rôle de deuxième barrière afin de garantir le confinement des produits radioactifs. Il doit également être capable de résister à la différence de pression due à un incident de dépressurisation du circuit secondaire. Enfin, comme il s'agit d'un échangeur gaz-gaz, il est nécessaire de rechercher une compacité maximale pour éviter des volumes trop importants, dûs à la moindre capacité thermique du gaz en tant que fluide caloporteur.

L'IHX a fait l'objet d'un prédimensionnement [BLA06] il comporte :

- un conteneur : enceinte pressurisée contenant l'ensemble des composants,
- des modules d'échangeur : on utilise ici la technologie plaques-ailettes pour l'ensemble des modules, réalisés avec un alliage type Inconel,
- un circulateur : il s'agit d'un compresseur axial (soufflante) destiné à compenser les pertes de charge sur le circuit secondaire (courant froid).

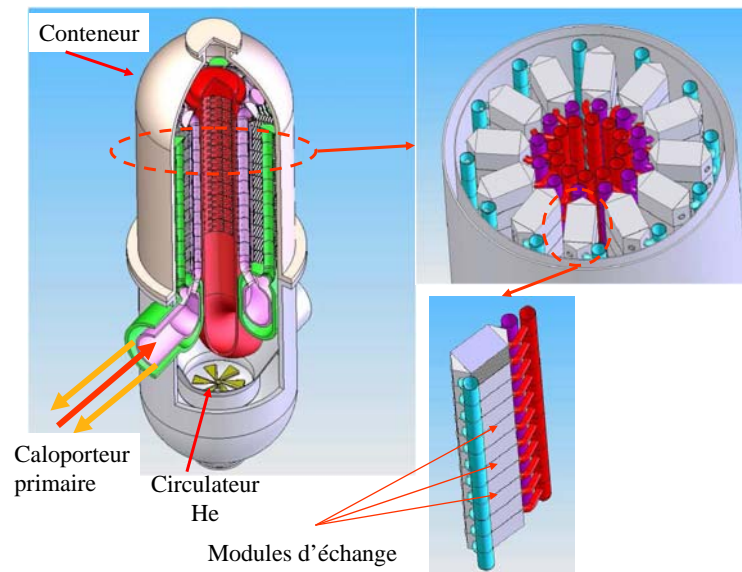


Figure I-7 – Coupe schématique de l'échangeur intermédiaire

1.1.2.3 – Boucle de distribution de chaleur

Le système de couplage réacteur - usine de production d'hydrogène consiste en un circuit intermédiaire dans lequel circule un caloporteur hélium, pour transmettre toute la chaleur fournie par le réacteur vers les usines de production d'hydrogène, comme le montre la (figure I-8). L'échangeur de chaleur intermédiaire (IHX) distribue la chaleur à plusieurs usines IS (Iode-Soufre), de façon indépendante : chaque usine sera positionnée en parallèle sur la boucle de distribution. Chaque usine présente cinq demandes thermiques, pour des températures et des puissances différentes. La température maximale fournie au cycle Iode-Soufre est de 900°C. La température de sortie de l'hélium des usines est relativement basse : 400°C.

L'objectif est de transmettre avec la plus grande efficacité possible (minimisation des pertes/destructions exergétiques du système) la chaleur à très haute température fournie par la chaudière nucléaire. Une soufflante de circulation de l'hélium sera nécessaire pour compenser les pertes de charges. La distance parcourue par le caloporteur intermédiaire lors de sa traversée de l'îlot nucléaire vers la zone des usines chimiques est supposée de 200 m dans cette étude. La minimisation des pertes thermiques et de la baisse de température de l'hélium intermédiaire impose une isolation thermique très importante des tuyauteries, en particulier de la tuyauterie hélium chaud entre la sortie de l'échangeur IHX à 900°C et les usines IS.

Les travaux d'analyse et les calculs effectués, permettent de définir la structure des tuyauteries à haute température. Une première couche d'isolant céramique ASH60, est disposée à l'intérieur de la tuyauterie sous pression pour protéger thermiquement l'acier de la conduite. Une seconde couche d'ASH60 puis un écran aux rayonnements thermiques sont ajoutés, autour de la conduite en acier.

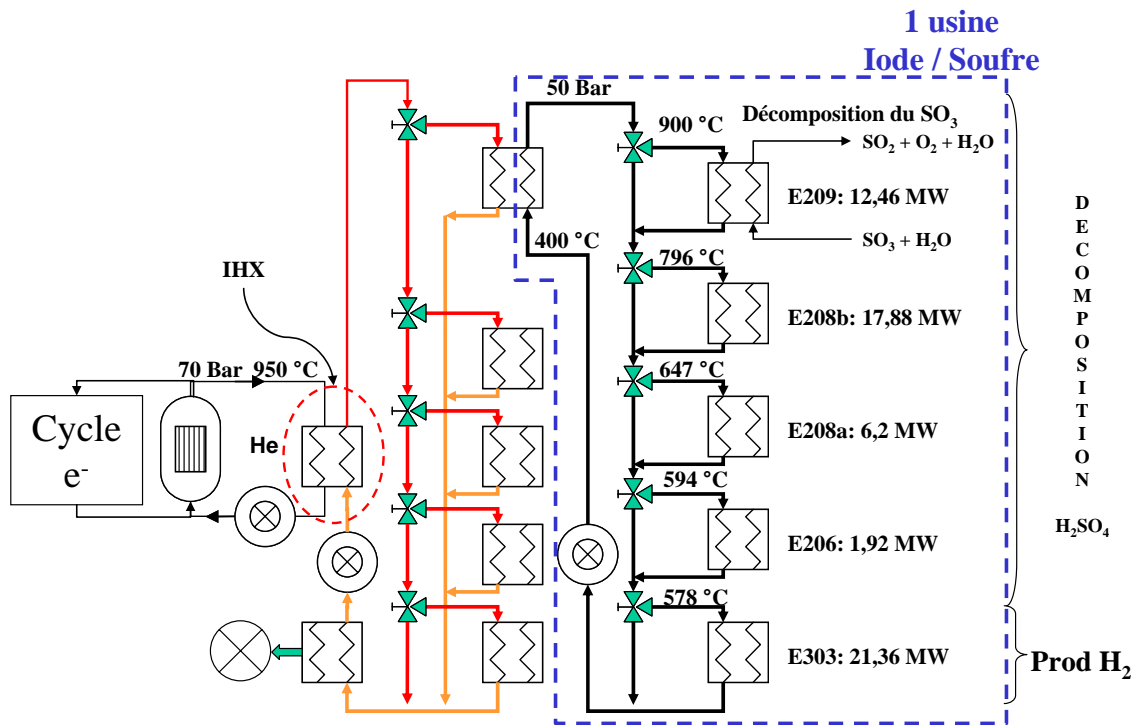


Figure I-8 – Réseau de distribution d'énergie vers les usines de production de H₂.

A l'heure actuelle, aucune estimation fiable de coût de ces conduites n'a été effectuée du fait d'une grande incertitude sur le coût de la céramique isolante et de son importance dans ce composant.

1.1.3 – Outils disponibles pour les études technico-économiques

Les études technico-économiques nécessitent des outils, adaptés aux données disponibles et représentatifs des systèmes évalués. La démarche d'optimisation nécessite un outil de simulation des systèmes et d'évaluation de leurs coûts. Ce point fait l'objet des paragraphes suivants.

1.1.3.1 – Simulation des systèmes CYCLOP/COPERNIC

Une des étapes essentielles est la modélisation thermodynamique des systèmes. Le logiciel CYCLOP [HAU04] permet de modéliser n'importe quel système de conversion d'énergie. Plusieurs types de composants peuvent être représentés : turbines, compresseurs, échangeurs, pompes, condenseurs... Aucune réaction chimique n'est modélisée. Pour chaque composant, les données sont les suivantes : courants d'entrée et de sortie, variation de pression ou taux de détente/compression, variation de température, puissance, efficacité isentropique et rendement. Les courants doivent également être décrits à l'aide des informations suivantes : température, pression, débit, enthalpie, entropie, et fraction du courant. Seules quelques unes de ces informations sont nécessaires pour obtenir la résolution du modèle.

Les caractéristiques des courants et des composants sont calculées par CYCLOP. Pour les cycles électrogènes, la production électrique totale ainsi que leur rendement sont également

calculés. Les systèmes modélisés dans ces travaux sont à la fois capables de produire de l'électricité et de la chaleur, aussi le rendement calculé automatiquement par CYCLOP ne permettra pas d'évaluer leur rendement. Un nouveau critère de performance devra donc être calculé.

Un synoptique du système modélisé ainsi qu'un diagramme Température-Entropie (T-S) permettent l'analyse des données fournies par le simulateur.

1.1.3.2 – Évaluation économique des systèmes

L'évaluation économique des systèmes se déroule en deux phases. La première consiste à évaluer le coût des composants avec des modèles suffisamment souples pour pouvoir être adaptés aux différents concepts. Les résultats de ces évaluations sont donc très sensibles au jugement de l'expert en charge de ces études. Les modèles issus de la littérature ne peuvent pas être utilisés car les hypothèses retenues sont rarement précisées : le développement de nouveaux modèles devra donc se baser sur les techniques retenues pour la mise au point des systèmes étudiés et sur les estimations de coût des matériels correspondants.

Ces contraintes limitent fortement les cas pouvant illustrer une quelconque démarche d'optimisation technico-économique. Ainsi, dans ce mémoire, seul le couplage entre un cycle électrogène direct (voir §1.1.1.2) et le cycle Iode-soufre, produisant de l'hydrogène (voir §1.1.1.3) peut être considéré. La notion de coût d'investissement est souvent le critère d'évaluation retenu, ce qui est réducteur car, sur la durée de vie, la maintenance et le coût du combustible sont non négligeables.

La seconde phase de l'évaluation économique consiste à estimer les coûts de construction, d'exploitation et maintenance, et de consommation d'énergie à partir d'heuristiques propres. Dans le domaine nucléaire, ce type de modèle existe : le logiciel SEMER [NIS03] permet de calculer le coût de production de l'énergie produite par un système intégrant un réacteur nucléaire. SEMER est constitué de modèles globaux de centrales nucléaires classiques mais également de modèles proches de conditions de fonctionnement du VHTR. Ces modèles peuvent donc être modifiés pour représenter les systèmes de cogénération considérés, ce qui constitue un objectif de ces travaux.

1.3 – Choix des critères d'optimisation

Les systèmes de cogénération étudiés produisent simultanément deux vecteurs, l'hydrogène et l'électricité, qui posent un problème d'équivalence énergétique. De plus, la détermination des coûts de production de chaque vecteur est rendue difficile par la difficulté d'isoler les composants contribuant exclusivement à la production d'électricité ou d'hydrogène.

1.3.1 – Choix d'un critère économique

La littérature fournit une seule référence [BIE06] permettant de poser, de façon claire les critères de sélection économiques de procédés de cogénération d'énergie. Cet état de l'art présente diverses méthodes de comparaison économique pour des cycles de cogénération en fonction du contexte industriel.

Certes, les nombreux critères exposés dans cet article ne sont pas forcément pertinents dans leur ensemble pour tous les problèmes. Un critère incontournable est la « Valeur actualisée nette du procédé » PW (*Present Worth*), exprimée par l'équation I-1.

$$PW = -I + \sum_{j=1}^n \frac{Q}{(1+k)^j} + \frac{S}{(1+k)^n} \quad (I-1)$$

avec :

- PW : Valeur actuelle du procédé
- I : Investissement
- Q : Flux financier de vente du produit – achat de matière première
- S : Fonds de roulement (à définir)
- k : Taux d'actualisation
- n : Années d'activité

Le terme de flux financier « Q » intègre clairement la notion de bénéfice. Il est souhaitable que les scénarii de marchés interviennent le plus tard possible dans le processus de choix des systèmes. Un critère d'optimisation dérivé de la valeur actualisée nette, adapté à la problématique de conception, est le coût total sur la durée de vie de l'installation impliquant l'investissement, les coûts de maintenance et de fonctionnement, du combustible et du démantèlement.

1.3.2 – Choix d'un critère énergétique

La comparaison des différentes formes d'énergies produites par une installation de cogénération pose un problème thermodynamique dès lors que l'on recherche une expression du rendement. En pratique, seul le second principe est souvent utilisé pour exprimer un rendement. L'équation I-2 donne un exemple d'expression simple du rendement de la cogénération d'électricité et d'hydrogène.

$$\eta_{Global} = \frac{W_e + W_{PCS H_2}}{W_{th}} \quad (I-2)$$

Avec :

- η_{Global} : Rendement global (%)
- W_e : Puissance électrique produite
- $W_{PCS H_2}$: Puissance équivalent Pouvoir Calorifique Supérieur de l'hydrogène
- W_{th} : Puissance thermique

L'énergie électrique et celle de l'hydrogène, vecteur « chimique » d'énergie, ne sont pas de même nature. L'utilisation du pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène peut également être contestée au profit du pouvoir calorifique inférieur, plus fréquemment utilisé pour les

énergies fossiles. En effet, il est thermodynamiquement impossible de convertir la totalité du pouvoir calorifique supérieur en une autre forme d'énergie, mécanique par exemple.

De plus, la littérature ne traite aucun exemple de critère énergétique unique pour la cogénération de l'électricité et de l'hydrogène.

Une autre approche consiste à réaliser un bilan entropique pour chacun des composants [MAR02] et permet également de calculer les pertes globales. Plus les créations entropiques sont importantes, et plus le rendement d'un système de conversion d'énergie est dégradé, quelle que soit la forme d'énergie produite (électricité, vapeur).

La création d'entropie globale peut constituer un critère d'optimisation général, mais négligent l'influence du milieu extérieur au système. Un système de conversion d'énergie n'est jamais isolé : il présente toujours des pertes thermiques vers l'atmosphère, à travers les parois des composants, ou principalement lors du refroidissement. L'entropie ne peut décrire un bilan d'énergie, aussi l'application du 1^{er} principe, à travers un bilan enthalpique simple doit être prise en compte.

Il est généralement admis en thermodynamique, que l'utilisation du premier et du second principe est suffisante pour décrire complètement un système. La théorie de l'exergie unit ces deux principes avec pour état de référence les conditions atmosphériques. La minimisation des pertes/destructions d'exergie, ou énergie « utile », pour l'ensemble des composants d'un système, équivaut à maximisation du rendement. La littérature manque globalement de clarté, non pas sur les résultats de cette approche, mais plutôt sur le calcul pratique des pertes/destructions : ces points feront donc l'objet d'une attention particulière dans ces travaux.

1.4 – Démarche adoptée

Compte tenu de la problématique de cogénération électricité hydrogène, qui vient d'être exposée, le mémoire de thèse s'articule autour des points suivants :

Le chapitre II porte sur le développement d'une stratégie d'optimisation multicritère en variables mixtes, sous contraintes, et d'un outil dédié, MULTIGEN conçu comme une bibliothèque d'algorithmes. Une réflexion particulière sera menée sur le choix d'algorithmes adaptés aux diverses études envisagée. Un exemple d'optimisation technico-économique d'une turbomachine est traité, comme application de MULTIGEN. Cet algorithme sera utilisé pour traiter des exemples d'application du critère énergétique du chapitre IV. MULTIGEN servira dans tous les problèmes d'optimisation traités dans ces travaux.

Le chapitre III traite du développement d'un critère d'optimisation technico-économique. La diversité des formes d'énergie produite rend nécessaire l'utilisation d'un critère basé sur la théorie de l'exergie, qui met sur le même plan thermodynamique l'électricité et l'hydrogène produit. La théorie de l'exergie permet le calcul des pertes/destructions exergetiques (énergie utile et mécanisable) pour chaque composant d'un système quelconque. Ainsi, le critère énergétique représente la somme des pertes sur le cycle électrogène, la distribution de chaleur et les usines de production d'hydrogène, ainsi que les rejets thermiques dans l'atmosphère.

Le chapitre IV porte directement sur l'application du critère d'optimisation exergetique, pour, d'une part, deux cycles électrogènes, et pour un système de cogénération électricité-chaleur, puis électricité-hydrogène (couplage avec le cycle Iode-Soufre) d'autre part. L'objectif est de prévoir les tendances d'évolution des solutions lors des optimisations qui seront proposées dans le chapitre VI. Des études de sensibilité de certaines variables d'optimisation du cycle direct He (type GT-MHR) vis à vis des pertes exergetique et de la production électrique (efficacité des composants comme les turbines, compresseurs et échangeurs).

Le chapitre V traite de l'analyse technico-économique des systèmes de cogénération, hydrogène-électricité, rendue complexe en raison de la frontière mal définie entre les sous-systèmes dédiés. Il implique de prendre en compte les infrastructures « autour » des systèmes de production (génie civil, systèmes auxiliaires, refroidissement, contrôle commande, etc ...), auxquels s'ajoutent les frais d'exploitation et de combustible. Dans ces conditions, le coût total de l'installation sur la durée de vie sera considéré. Une étude approfondie sera menée pour déterminer une fonction de coût pour chaque composant : turbomachine (cycle de Brayton) de concept GT-MHR et IHX (échangeur intermédiaire entre le réacteur et le transport du caloporteur vers les usines de production d'hydrogène). Une étude bi-critère (minimisation des pertes exergetiques et minimisation du coût total de l'installation sur la durée de vie) est présentée dans le cas particulier de la production d'électricité, par un cycle direct type GT-MHR.

Le chapitre VI constitue la finalité de ce travail et propose la stratégie d'optimisation technico-économique des systèmes de cogénération, couplant un réacteur VHTR avec le cycle Iode-Soufre, et analyse différents scénarii.

Une conclusion générale fera la synthèse des principaux acquis de ce mémoire et dégagera quelques perspectives.

CHAPITRE II

Stratégie d'optimisation multicritère par algorithmes génétiques

2.1 - Introduction

Les modèles de simulation utilisés dans le cadre du travail sur la conversion d'énergie (CYCLOP et COPERNIC, pour la modélisation thermodynamique, et SEMER pour l'évaluation économique) serviront de base pour calculer les critères de performances des systèmes. Le recours à ces simulateurs rend inapplicables les méthodes classiques d'optimisation déterministe qui nécessitent de garantir des propriétés mathématiques, telles la continuité et la dérivabilité sur le domaine exploré. Or, les problèmes d'optimisation, envisagés ici impliqueront des variables de structure (entières, binaires) et des variables liées aux conditions opératoires (continues), qualifiés de mixtes.

Ce chapitre se décompose en trois parties :

- la première est dédiée à la présentation des algorithmes d'optimisation multicritère, avec une attention particulière à la prise en compte des variables continues, entières et binaires. L'analyse de ces méthodes permettra d'établir l'algorithme qui sera appliqué, et de déterminer les méthodes à développer pour satisfaire les objectifs généraux,
- la deuxième partie présente les développements réalisés pour créer une bibliothèque d'algorithmes d'optimisation, appelée MULTIGEN. Les algorithmes et les mécanismes développés seront détaillés et appliqués à des exemples mathématiques simples,
- puis la dernière partie traitera du couplage de MULTIGEN avec les outils CYCLOP, COPERNIC et SEMER pour traiter les exemples illustrant la méthodologie proposée dans ces travaux. Un exemple d'optimisation technico-économique d'une turbomachine électrogène servira de support méthodologique pour démontrer l'intégration du prédimensionnement d'un de ces composants (modèle COPERNIC du récupérateur de chaleur), couplé au simulateur CYCLOP.

2.2 – Algorithmes et méthodes multiobjectif : état de l'art pour les problèmes en variables mixtes

2.2.1 – Notions générales sur l'optimisation multiobjectif

Les problèmes réels impliquent généralement des critères de performance contradictoires : ces critères sont appelés fonctions objectifs. A la fin du XIX^{ème} siècle, l'économiste Wilfredo Pareto [PAR96] formule le concept d'optimum de Pareto comme solution à des problèmes multiobjectif : c'est un ensemble de solutions de compromis entre les différents critères retenus.

En se basant sur le formalisme introduit par Fonseca et Fleming [FON98], un problème général multiobjectif consiste en un ensemble de n critères f_k , $k = 1, \dots, n$ à maximiser ou minimiser. Chaque critère f_k peut être non linéaire, mais aussi discontinu en fonction des m variables x dans un espace U à m dimensions.

$$f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \quad (\text{II-1})$$

Ce type de problème n'a généralement pas une solution unique, mais présente un ensemble de solutions non dominées, appelé ensemble de Pareto, ou front de Pareto. Le concept de domination selon Pareto se base sur deux règles fondamentales.

Dans un espace U , un vecteur $u = (u_1, \dots, u_n)$ domine un autre vecteur $v = (v_1, \dots, v_n)$, si et seulement si,

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}: u_i \leq v_i \wedge \exists i_0 \in \{1, \dots, n\}: u_{i_0} < v_{i_0} \quad (\text{II-2})$$

Pour un problème d'optimisation donné, l'équation (II-2) donne la définition suivante pour le front de Pareto : pour un ensemble de n critères, une solution $f(x)$, liée à la variable de décision $x = (x_1, \dots, x_m)$, domine une autre solution $f(y)$, liée à la variable de décision $y = (y_1, \dots, y_m)$ quand les conditions suivantes sont vérifiées (pour un problème de minimisation) :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}: f_i(x) \leq f_i(y) \wedge \exists i_0 \in \{1, \dots, n\}: f_{i_0}(x) < f_{i_0}(y) \quad (\text{II-3})$$

Pour un ensemble donné de solutions, il est possible de distinguer les ensembles de solutions non dominées. Cette propriété implique, d'après Jensen [JEN03] qu'il est possible de réduire un problème d'optimisation à n dimensions, en un problème à une dimension : plusieurs algorithmes comme NSGA II [DEB02] utilisent ce principe de non domination.

Les problèmes multiobjectif sous contraintes sont les plus répandus parmi les problèmes d'ingénierie. En général, trois types de contraintes sont considérées : inégalité (\leq), inégalité stricte ($<$) et égalité ($=$) :

$$\left. \begin{array}{l} g(x) \leq c1 \\ r(x) < c2 \\ h(x) = c3 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{constr1}(x) = c1 - g(x) \geq 0 \\ \text{constr2}(x) = c2 - r(x) > 0 \\ \text{constr3}(x) = c3 - h(x) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II-4})$$

où (g,r,h) sont des fonctions réelles de la variable de décision $x = (x_1, \dots, x_m)$ dans un espace U de dimension m , et où $(c1,c2,c3)$ sont des constantes. Plus généralement, les contraintes peuvent être représentées par des vecteurs du type,

$$\begin{array}{l} \overline{\text{constr1}}(x) = ((c1 - g(x))_1, \dots, (c1 - g(x))_{n1}) = (\text{constr1}(x)_1, \dots, \text{constr1}(x)_{n1}) \geq 0, \\ \overline{\text{constr2}}(x) = ((c2 - r(x))_1, \dots, (c2 - r(x))_{n2}) = (\text{constr2}(x)_1, \dots, \text{constr2}(x)_{n2}) > 0, \\ \overline{\text{constr3}}(x) = (|c3 - h(x)|_1, \dots, |c3 - h(x)|_{n3}) = (\text{constr3}(x)_1, \dots, \text{constr3}(x)_{n3}) = 0 \end{array} \quad (\text{II-5})$$

où $n1, n2$ et $n3$ sont respectivement, les nombres d'inégalités, d'inégalités strictes et d'égalités. Cette écriture des contraintes implique que chaque valeur constr_i sera négatif si et seulement si cette contrainte n'est pas respectée.

Cette écriture unifiée permet de faciliter l'interprétation par des programmes de lecture automatique des problèmes mathématiques. En pratique, les contraintes d'égalité ne pourront jamais être satisfaites si les fonctions appartiennent à l'espace des réels. Aussi, les contraintes d'égalité doivent être écrites de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} \overline{\text{constr3}}'(x) = (|c3 - h(x)|_1 + \varepsilon_1, \dots, |c3 - h(x)|_{n3} + \varepsilon_{n3}) = \overline{\text{constr3}}(x) + \vec{\varepsilon} \\ \vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n3}), \forall i \in \{1, \dots, n3\}, \varepsilon_i \in R \end{array} \quad (\text{II-6})$$

$\vec{\varepsilon}$ est appelé "vecteur précision" du vecteur des contraintes d'égalité déterminé en fonction de l'erreur de troncature de la machine utilisée.

Cette approximation n'est pas nécessaire lorsque la contrainte d'égalité n'implique que des variables entières : les contraintes d'égalité sont à réserver à des expressions fournissant des valeurs entières, ce qui permet de garantir qu'elles peuvent atteindre un « 0 » véritable. Globalement, la satisfaction de l'ensemble des contraintes équivaut à minimiser la déviation des contraintes, formulées selon l'équation II-4.

D'après Fonseca et Fleming [FON98], la satisfaction d'un ensemble de contraintes d'inégalité est clairement un problème d'optimisation multiobjectif. D'un point de vue théorique, un problème d'optimisation multiobjectif sous contraintes est en réalité un problème dont la résolution se fait en deux temps. La première étape implique la comparaison des degrés de satisfaction des contraintes entre deux solutions, en utilisant la définition de la domination selon Pareto (équation II-3), mais une solution plus simple consiste à comparer la somme des violations des contraintes uniquement : cette dernière solution a été proposée par Deb [DEB02] dans l'algorithme NSGA II, ce qui implique qu'il ne soit pas attribué de règle de priorité entre contraintes. Cette étape doit être réalisée de prime abord, avant la seconde étape consistant à comparer les fonctions objectifs.

2.2.2 – Approche d'optimisation retenue : algorithmes génétiques

La nature même du problème multiobjectif implique que la solution est en fait un ensemble de solutions. Ce type de problème est donc hors de portée des méthodes déterministes classiques (ϵ contraintes, somme pondérée), pour lesquelles il est nécessaire de lancer l'algorithme autant de fois que de solutions souhaitées. Il est donc nécessaire de se tourner vers des algorithmes capables de traiter un ensemble de solutions. Les algorithmes génétiques sont particulièrement adaptés pour atteindre les solutions du front de Pareto.

2.2.2.1 – Principe des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques dérivent de la découverte par les généticiens (Watson et Creek) dès la fin des années 1950, de la dépendance des individus envers la structure de leur code génétique et de l'évolution de ce code au cours des générations. Celle-ci a été formalisée plus tard par de nombreux numériciens, tels que Holland [HOL75] et Goldberg [GOL89].

En favorisant la survie des individus les plus aptes (les solutions les plus correctes), des individus meilleurs que ceux des générations précédentes peuvent apparaître. Le mécanisme d'encouragement des éléments les plus aptes (élitisme) a pour résultat de produire des générations successives de plus en plus adaptées à l'approche d'une solution optimale.

Dans un algorithme génétique on associe à chaque individu une fonction d'adaptation, ou force, pour chaque critère que la procédure tente d'optimiser. Les solutions-individus sont représentées par un codage numérique, ou génotype de façon univoque. Une fonction de décodage sert à évaluer la (ou les) fonction(s) objectif(s). Le codage représente le point fondamental des algorithmes génétiques, car il doit permettre, d'une part, de pouvoir énumérer toutes les solutions comprises dans l'espace délimité par les contraintes inhérentes au problème posé, et d'autre part, tout individu engendré à partir des opérateurs génétiques doit également respecter ces contraintes. C'est essentiellement le cas de l'opérateur de croisement, qui à partir de parents viables, peut engendrer des enfants monstrueux.

L'implémentation d'un algorithme génétique nécessite de fixer un certain nombre de paramètres et de procédures, qui sont déterminants sur leur efficacité.

- (i) Taille de la population.
- (ii) Génération de la population initiale (généralement de façon aléatoire).
- (iii) Taux de survie, i. e. le nombre d'individus survivants d'une génération à la suivante.
- (iv) Choix des individus survivants (on utilise fréquemment la roulette biaisée de Goldberg, 1989, ou la méthode de tournoi).
- (v) Taux et procédure de croisement (généralement, deux parents choisis aléatoirement dans la population courante génèrent deux enfants).
- (vi) Taux et procédure de mutation.
- (vii) Taux d'élitisme (un certain nombre de meilleurs individus de la population parents est intégré d'office dans la population enfants).
- (viii) Le nombre de clones tolérés pour un individu.
- (ix) Arrêt de la recherche : soit sur un nombre maximal de générations, soit lorsque les caractéristiques statistiques (moyenne et écart-type de la population) n'évoluent plus.

Le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques est particulièrement adapté à l'utilisation de modèles de type « boîte noire », où seules les valeurs des critères et des contraintes sont examinées indépendamment de leur propriétés mathématiques. De plus, les algorithmes génétiques sont aptes à traiter de façon satisfaisante les problèmes multiobjectif (adaptation à des contraintes diverses), ce qui renforce l'intérêt de leur utilisation.

2.2.2.2 – Développements algorithmiques en variables continues

L'optimisation multiobjectif en variables continues a été développée par de nombreux auteurs dans la littérature.

Parmi les algorithmes génétiques les plus répandus, il convient de mentionner :

- VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) [SCH85] : dans une population, les meilleurs individus sont sélectionnés pour chaque critère séparément. La sélection se fait par force proportionnelle pour chaque critère. Par ce type de sélection, une convergence prématurée autour des points optimaux monocritère est à craindre,
- NPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) [HOR94] : cette méthode permet d'éviter une convergence prématurée vers un optimum monocritère. Pour préserver la diversité des individus, le concept de niche (en quelque sorte une sous-population stable d'individus très proches les uns des autres) est proposé. La difficulté de cette méthode consiste à choisir une taille de sous-population adéquate pour cette comparaison,
- MOGA (*Multi Objective Genetic Algorithm*) [FON93] : cette méthode proposée implémente une fonction de domination, et ensuite un module décrivant les préférences du décideur. La fonction de domination est construite en comptant pour un individu i le nombre de fois qu'il est dominé par les autres, pour proposer un classement de tous les points. L'utilisation de cette fonction de partage fait

converger les individus vers les solutions globales non-dominées. Parmi celles-ci, une fonction de partage est introduite dans l'espace des critères,

- SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) [ZIT99] : cet algorithme permet d'obtenir les points de la zone de Pareto par la définition de leur force tout en conservant une certaine diversité. Les points non-dominés de la population sont triés et contrairement à l'approche de type MOGA, on leur attribue une force correspondant au nombre de points qu'ils dominent. Cette force est divisée par le nombre d'individus formant la population ($n+1$),
- NSGA II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), [SRI95], [DEB02] : cette méthode, introduit la notion de rang de non-domination pour évaluer la force de chaque individu. Des procédures d'élitisme, visant à conserver les meilleures solutions, de génération en génération, contribuent à accélérer la vitesse de convergence et les performances générales des algorithmes génétiques. La diversité est également garantie à l'aide d'une méthode de « *crowding* » ne nécessitant pas de paramètre supplémentaire,

Le développement de méthodes d'optimisation multicritère a également fait l'objet de nombreux travaux de thèse au sein de l'équipe Conception Optimisation et Ordonnancement des Procédés du Laboratoire de Génie Chimique (CNRS UMR 5503), sur des problèmes monocritères sans contrainte avec codage binaire et entier des variables et des opérateurs génétiques. Les problèmes traités sont essentiellement des problèmes de conception de procédés ([LAQ97],[AZZ98],[BAU99],[LAQ01]). Le codage binaire des variables induit une discrétisation de l'espace de recherche, la précision dépendant du nombre de bits choisi. Ces opérateurs génétiques de « première génération » peuvent se révéler obsolètes face à des problèmes en variables continues. Des algorithmes génétiques diploïdes ont été développés pour le CEA de Saclay (VIZIR [ARN04, PER97, DUM02, DUM03]).

2.2.2.3 – Développements sur les algorithmes génétiques en variables mixtes.

D'autres travaux au sein du Laboratoire de Génie Chimique ont développé des procédures pour traiter le cas des variables mixtes pouvant être rencontrés :

- optimisation monocritère en variables mixtes avec ou sans contraintes, typiquement issus de problématiques industrielles : le codage binaire des variables [MON04] a été progressivement abandonné au profit d'opérateurs génétiques continus. La gestion des contraintes a particulièrement été étudiée pour les problèmes de structure ([PON07a], [PON07b], [PON08]),
- optimisation multicritère sans contrainte avec codage binaire des variables : l'algorithme principal utilisé pour ces travaux ([BER02], [DED03], [ATM03], [DIE04], [DIE05], [DIE06], [DIE07]) utilise une procédure où la sélection des individus se fait indépendamment pour chaque critère. Ce type de sélection favorise les meilleures solutions de chaque critère, au lieu de favoriser les

solutions de compromis. Le codage binaire ou entier des variables est également un obstacle.

Pour des problèmes en variables mixtes (entières et continues), Shopova et Bancheva [SHO06] ont décrit des opérateurs génétiques spécifiques dans le domaine des réels : ces opérateurs sont décrits dans le paragraphe 2.3.1.3.

2.2.2.4 – Conclusion et choix d'algorithmes

L'objectif principal de développement de la bibliothèque d'algorithmes génétiques MULTIGEN consiste à traiter des problèmes d'optimisation multicritère, sous contraintes, en variables mixtes (continues, entières et binaires) impliquant des choix de structure, notamment de composants. Elle doit être également compatible avec les outils du CEA, ce qui nécessite le développement d'une interface Excel.

Dans cet objectif, il est nécessaire de justifier le choix de l'algorithme dont les mécanismes et le concept sont les plus adaptés au problème à résoudre :

- *Codage des variables impliquant une compétition entre codages binaire et réel* : le codage binaire ne permet pas d'explorer correctement l'espace de recherche, à cause des erreurs de troncature. Les algorithmes mono et multicritères basés sur ces principes ne sont pas applicables en l'état.
- *Adéquation avec les principes de domination de Pareto (voir §2.2.1)* : il faut examiner les principes de sélection des individus. Les algorithmes basés sur une sélection par critères indépendants, comme VEGA [SCH85], mais également les algorithmes développés dans l'équipe ([BER02], [DED03], [ATM03], [DIE04], [DIE05], [DIE06], [DIE07]) ne sont pas adaptés. La gestion des contraintes figure également dans les critères de domination : cette notion est présente dans la totalité des algorithmes capables de gérer les contraintes.
- *Gestion de la diversité des populations* : les algorithmes basés sur la notion de niches, comme NPGA [HOR94] et MOGA [FON93] ne permettent pas d'assurer une convergence correcte du front de Pareto. La méthode des niches nécessite de trouver un équilibre sur le nombre d'individus traités mais n'est pas adaptée à une utilisation pour des problèmes généraux. Des algorithmes tels que SPEA [ZIT99] ou NSGA I & II ([SRI95], [DEB02]) se basent sur le principe que les individus non-dominés isolés sont plus favorisés que les individus appartenant à des zones denses. Dans SPEA, la probabilité de sélection est fonction de l'isolement de l'individu, ce qui implique une quantification de cette probabilité, et donc la mise en œuvre d'algorithmes plus complexes. NSGA II opte pour une élimination pure et simple des individus des zones denses après un tri selon leur densité.

Compte tenu des points énoncés, l'algorithme NSGA II est à l'heure actuelle celui qui réunit le plus de points concordants avec les objectifs énoncés. Le choix d'un algorithme n'est en rien limitant car la stratégie de développement de MULTIGEN sera orientée vers le développement des mécanismes d'algorithmes, et non vers les algorithmes eux-mêmes. L'objectif est de se doter d'une bibliothèque de procédures compatibles permettant le

développement et l'extension d'algorithmes. NSGA II fera donc l'objet d'une étude approfondie dans le paragraphe suivant (§2.2.3.1), suivie d'un bilan sur les actions de développement nécessaires (§2.2.3.2) pour atteindre les objectifs généraux.

2.2.3 – Analyse de NSGA II et développements nécessaires pour MULTIGEN

2.2.3.1 – Description de NSGA II

NSGA II est le premier algorithme codé dans MULTIGEN et reproduit exactement la structure proposée par Deb & al [DEB02] (voir figure II-1 et tableau II-1). NSGA II traite des problèmes multicritères, sous contraintes d'inégalité (uniquement) pour des variables continues.

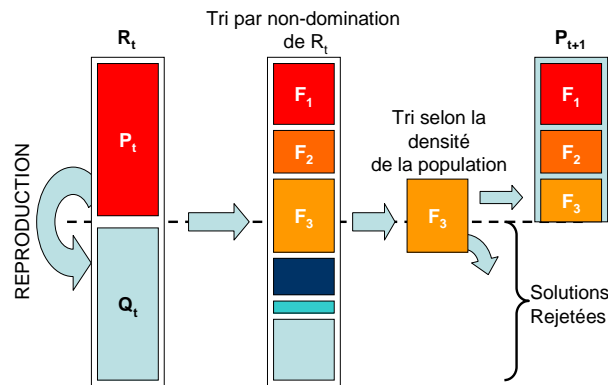


Figure II-1 – Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA II

Une population initiale est générée aléatoirement, puis elle subit un tri par non domination. Chaque solution se voit affecter une force, ou rang, égal à son niveau de non domination (1 pour le meilleur niveau, 2 pour le niveau suivant, etc...). L'étape de reproduction (figure 3) consiste en un tournoi binaire pour la sélection des parents. Deux individus de la population sont choisis aléatoirement dans la population. Le tournoi est basé sur une comparaison de la domination sous contraintes des deux individus en utilisant les règles ci-après.

Un individu A domine B si et seulement si l'une des conditions est vérifiée :

- 1 - A satisfait les contraintes et B non,
- 2 - A et B ne satisfont pas les contraintes mais le degré de violation des contraintes de A est moins fort que celle de B,
- 3 - A et B satisfont les contraintes et A domine B.

Pour un individu, le degré de violation des contraintes est égal à la somme des valeurs de violation pour des contraintes écrites selon la forme II-4.

Pour une génération t donnée, on crée $R_t = P_t \cup Q_t$, Q_t étant la population enfant de la population précédente P_t : R_t inclut les individus de P_t , ce qui assure le caractère élitiste de NSGA II. La population R_t contient $2N$ individus. R_t subit ensuite un tri par non domination :

les individus sont regroupés dans des fronts de non domination tels que F_1 représente les individus de rang 1, F_2 les individus de rang 2, etc...

L'objectif suivant est de réduire le nombre d'individus de $2N$ (dans la population R_t) à une population P_{t+1} de taille N . Si la taille de F_1 est inférieure à N , alors tous les individus de F_1 sont conservés. Il en est de même pour les autres fronts dès lors que le nombre d'individus conservés ne dépasse pas la taille N . Si l'on prend l'exemple de la figure 3, le front F_2 est intégralement conservé mais la conservation du front F_3 va entraîner un dépassement de la taille N de la population P_{t+1} . Il faut alors procéder à une sélection des individus de F_3 à conserver. NSGA II fait intervenir dans ce cas un mécanisme de préservation de la diversité de la population basé sur l'évaluation de la densité des individus autour de chaque solution, à travers une procédure de calcul de « distance de proximité ». Une faible valeur de la distance de « proximité » pour un individu correspond à un individu « bien entouré ». On procède alors à un tri décroissant (tournoi binaire, en général) selon cette distance de proximité pour retenir les individus du front F_3 et éliminer ainsi les individus des zones les plus denses. On complète de cette façon la population P_{t+1} . Les individus ayant des valeurs extrêmes pour les critères sont également préservés par ce mécanisme, permettant ainsi de conserver les bornes extérieures du front de Pareto.

À la fin de cette phase, la population P_{t+1} est créée. Puis une nouvelle population Q_{t+1} est générée par reproduction à partir de P_{t+1} . On poursuit itérativement la procédure décrite ci-dessus jusqu'au nombre maximal de générations fixé par l'utilisateur. D'un point de vue général, cet algorithme permet de maintenir l'élitisme et la diversité sans ajouter de paramètres supplémentaires, tout en utilisant un algorithme séduisant par sa simplicité avec un minimum de paramètres de réglage.

Tableau II-1 – Pseudo code de l'algorithme NSGA II

Procédures	Commentaires
$R_t = P_t \cup Q_t$ $F = \text{tri-par-non-domination}(R_t)$ $P_{t+1} = \emptyset$ et $i = 1$ Tant que $ P_{t+1} + F_i \leq N$ Calcul-densité-inter-individus(F_i) $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ $i = i + 1$ Tri-distance-inter-individu(F_i) $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - P_{t+1})]$ $Q_{t+1} = \text{faire-nouvelle-population}(P_{t+1})$ $t = t + 1$	Combinaison des populations parent (P_t) et enfant (Q_t) $F = (F_1, F_2, \dots)$, ensemble de fronts de non-dominance de R_t Boucle tant que la population P_{t+1} à une taille inférieure à N Calcul de la densité inter individus dans le front F_i Ajout du front F_i à la population P_{t+1} Tri par individus appartenant à des zones de densité croissante On choisit les $(N - P_{t+1})$ premiers éléments de F_i Création d'une nouvelle population Q_{t+1} en utilisant les étapes de sélection, croisement et mutation Incrément du compteur de génération

D'un point de vue général, cet algorithme permet de maintenir l'élitisme et la diversité sans ajouter de paramètres supplémentaires, tout en utilisant un algorithme séduisant par sa simplicité avec un minimum de paramètres de réglage.

2.2.3.2 – Bilan des développements nécessaires pour MULTIGEN

La bibliothèque MULTIGEN développée au cours de cette thèse se base sur l'algorithme de référence NSGA II. Cet algorithme présente des mécanismes évolués de gestion de l'élitisme, de la diversité mais se limite uniquement aux variables continues. L'analyse de l'algorithme (voir §2.2.3.1) permet de mettre en évidence des améliorations nécessaires :

- La prise en compte des variables entières et binaires : NSGA II ne traitant que les variables continues, les opérateurs de croisement et mutation devront être modifiés (voir §2.3.1.1, §2.3.1.2, §2.3.1.3).
- La production de clones : les opérateurs de croisement présentent une probabilité non négligeable de générer des clones. Compte tenu du caractère élitiste de la procédure de reproduction et de sélection, il y a un risque de reproduction des clones et d'accumulation de ceux-ci. Les opérateurs de croisement doivent être adaptés pour éviter leur création de façon préventive par une mutation forcée des enfants s'ils sont des clones de leurs parents (voir détails [GOM08]).
- Ajout de contraintes inégalité stricte et égalité : pour traiter des problèmes plus complexes, il est nécessaire de disposer de tous les types de contraintes. Le mode de calcul du degré de violation des contraintes doit être modifié (voir détails [GOM08]).
- La règle de domination sous contraintes utilisée par NSGA II présente une faille algorithmique dans le cas où deux individus ont le même degré de violation des contraintes. Ce cas se présente notamment lorsque deux clones sont comparés, ou quand le problème présente des contraintes égalités dont le degré de violation est un nombre entier : dans ce cas, on considérera uniquement les critères pour la détermination de la domination (voir détails [GOM08]).
- Aucune recherche n'a été menée sur un critère d'arrêt pour des algorithmes multicritères. Une première solution sera proposée (voir §2.3.1.7).
- Dans le cas où les critères et les contraintes ne peuvent être calculés, l'ensemble de l'algorithme est paralysé. Une valeur numérique doit donc être fournie pour les critères et les contraintes en pareil cas (voir détails [GOM08]).
- Pour l'ensemble des algorithmes présentés, l'initialisation est purement aléatoire. Une méthode de quadrillage couvrant mais aléatoire de l'espace de recherche est proposée (§2.3.1.8).
- Une interface utilisateur générique est développée pour l'ensemble des algorithmes implantés dans MULTIGEN (§2.3.1.9).

MULTIGEN a donc pour objectif d'étendre les principes de NSGA II sur l'ensemble de ces points. Le développement de MULTIGEN tient compte de contraintes imposées principalement par les outils mis à disposition (CYCLOP, COPERNIC et SEMER voir description chapitre I) par le CEA pour une utilisation sur Excel[®]. Ils nécessitent le codage de fonctions spéciales en langage VBA. MULTIGEN se présente sous forme d'une macro

complémentaire Excel, contrôlable à partir d'une barre d'outils supplémentaire et d'une interface de codage des problèmes mathématiques générée automatiquement sur une feuille Excel particulière.

2.3 – Développement algorithmiques sous MULTIGEN

2.3.1 – Développement de procédures

2.3.1.1 – Codage des individus et des populations

Chaque solution (ou individu) doit être décrite par un ensemble de variables de décision, appelé chromosome, associées aux valeurs des fonctions objectifs et à ses contraintes (équations II-5 et II-6), comme évoqué dans le paragraphe 2.2.3. Trois types de variables sont représentés dans MULTIGEN (voir figure II-2). Le chromosome (vecteur « Var ») est accompagné d'un vecteur « Type_Var » donnant le type de variable à chaque emplacement : les variables continues sont représentées par 0, les variables entières par 1 et binaires par 2.

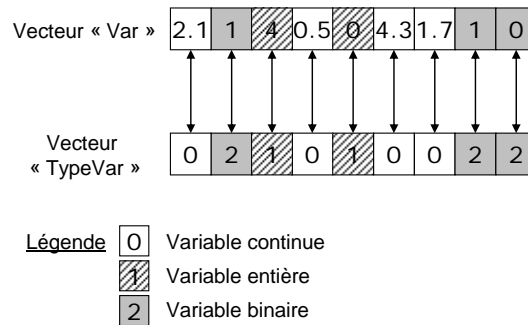


Figure II-2 – Codage des chromosomes dans MULTIGEN

2.3.1.2 – Croisement et mutation pour les variables entières-binaires

L'utilisation de variables entières dans les problèmes d'optimisation nécessite des opérateurs adaptés. Dans MULTIGEN, on a choisi d'adapter les opérateurs de croisement et de mutation des variables continues. On utilise une méthode de changement d'espace, proposée par Shopova et Bancheva [SHO06], après un croisement SBX (voir annexes chapitre II ou une mutation dans l'espace des variables continues, proposées par Deb et Goyal [DEB96]. La variable continue u_i^* , liée à la composante u_i de la variable de décision $u=(u_1, \dots, u_m)$, est réduite en \bar{u}_i^* dans un domaine continu [0, 1] en utilisant l'équation II-7. La variable de décision \bar{u}_i^* redevient une grandeur entière avec l'équation II-8.

$$\bar{u}_i^* = \frac{u_i - u_i^{Min}}{u_i^{Max} - u_i^{Min}} \tag{II-7}$$

$$u_i = \begin{cases} \text{si } 0 \leq \bar{u}_i^* < 1, & u_i^{Min} + \bar{u}_i^* \times [u_i^{Max} - u_i^{Min} + 1] \\ \text{si } \bar{u}_i^* = 1, & u_i^{Max} \end{cases} \tag{II-8}$$

Les variables binaires (0 ou 1) sont traitées différemment. Si un nombre aléatoire, entre 0 et 1, est inférieur à une probabilité donnée, le croisement consiste en une simple permutation des valeurs binaires (voir figure II-3), et la mutation en changement de valeur classique de 0 en 1, ou de 1 en 0 (voir figure II-4).

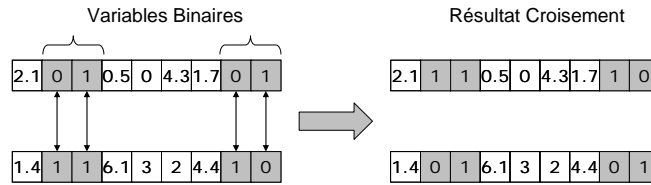


Figure II-3 – Règle de croisement pour les variables binaires

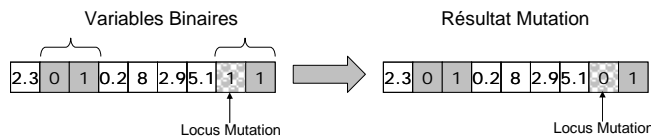


Figure II-4 – Règle de mutation pour les variables binaires

2.3.1.3 – Croisement et mutation pour les problèmes de structure

Un problème de structure est un problème de conception d'un procédé, où l'on recherche simultanément la structure de procédé et les conditions opératoires des opérations unitaires qui le composent. Si l'on considère dans un procédé chimique classique, un sous-procédé « réacteur », on peut par exemple être confronté au problème du choix entre un réacteur piston et un ensemble pouvant comporter jusqu'à 3 réacteurs agités continus (voir figure II-5).

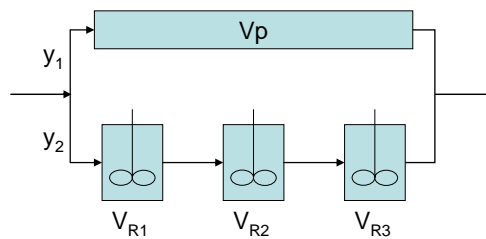


Figure II-5 – Problème d'optimisation structurelle

y_1 et y_2 sont des variables binaires codant l'existence ou non des deux branches.

Si $y_1 = 1$ alors, $V_p > 0$ et $V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = 0$.

Si $y_2 = 1$ alors, $V_p = 0$, $V_{Ri} \neq 0$ et $V_{Ri} \neq 0$, $R_i = 1$, NR .

Certains types de problèmes d'optimisation impliquent une dépendance structurelle entre des variables binaires, entières et continues.

Dans des problèmes réels, les variables binaires codent existence ou non d'un appareil qui entraîne l'existence de variables continues ou entières associées à cet appareil (conditions de fonctionnement, nombre d'étages). Mathématiquement, on représente le fait qu'une variable continue x_1 vaut 0 si la variable binaire y_1 vaut 0 par l'inégalité II-9.

$$x_1 - M \times y_1 \leq 0 \quad (\text{II-9})$$

La valeur M est fixée de telle sorte que x_1 décrive tout son domaine de variation. Ces liens d'existence logique ont fait l'objet d'un développement particulier dans MULTIGEN. L'objectif est de créer des opérateurs de croisement et de mutation capables de prendre en compte des liens logiques entre les différents types de variables, sans avoir à coder des contraintes supplémentaires (équation II-9). Ces contraintes sont introduites dans MULTIGEN mais nécessitent un langage de description particulier examiné dans l'exemple du paragraphe 2.3.2.2.2. Le principe est assez simple : si une variable binaire vaut « zéro » alors les variables entières et continues liées à la variable binaire doivent être automatiquement mises à zéro. De plus, le croisement et la mutation sur ces variables entières et continues ne doivent intervenir que si la variable binaire n'est pas nulle : on développe donc des opérateurs génétiques capables de traiter sélectivement les variables « liées » et les variables « non liées » grâce à un codage des liens entre les variables.

Le croisement se fait selon les procédures suivantes :

- Croisement des variables binaires (phase I figure II-6) où MULTIGEN connaît la position des variables binaires dans le chromosome « Var » (voir figure II-1).
- Croisement des variables entières (phase II figure II-6) en fonction des liens logiques entre variables binaires et entières :
 - Croisement classique des chromosomes des parents,
 - Rectification des valeurs pour chaque individu : si la(les) variable(s) binaire(s) liée(s) à la variable entière vaut(valent) 0, alors la variable entière vaut 0.
- Croisement des variables continues (phase II figure II-6) en fonction des liens logiques entre variables binaires et continues, et entre variables entières et continues :
 - Croisement normal des variables des parents,
 - Rectification des valeurs pour chaque individu : si la(les) variable(s) binaire(s) et/ou variable(s) entière(s) liée(s) à la variable continue valent 0, alors la variable continue vaut 0,
- Croisement des variables binaires, entières et continues n'ayant aucun lien de dépendance.

Les règles de mutation sont identiques à celles énoncées ci-dessus, et sont représentées sur la figure II-6.

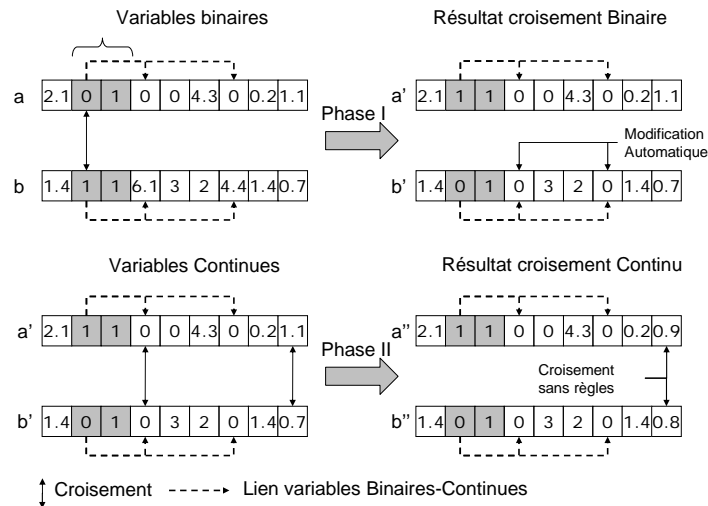


Figure II-6 – Règles de croisement (liens entre variables binaires et continues)

2.3.1.4 – Gestion des clones

Les clones sont des individus/solutions dont les chromosomes/variables sont strictement identiques. Au cours des générations, les opérations de croisement et de mutation possèdent une probabilité non négligeable d'engendrer des individus identiques à ceux existants. Dans ce cas, le risque d'une multiplication exponentielle du nombre de clones nuit à la diversité de la population, et donc à la qualité des résultats : il faut limiter le nombre de ces clones. Dans MULTIGEN, une mutation forcée des individus a lieu à la fin d'un croisement si et seulement si cette opération a généré des individus identiques aux parents. On évite ainsi de mettre en œuvre de coûteuses procédures de recherche des clones au sein des populations, simplement en évitant qu'ils ne se forment.

2.3.1.5 – Calcul du degré de violation des contraintes

Le degré de violation des contraintes est la somme des valeurs de dépassement (négatives en cas de non respect) pour des contraintes écrites sous la forme de celles du paragraphe 2.1 (équation II-4). Après l'évaluation d'un individu (calcul des critères et des contraintes), le calcul du degré de violation intervient. Ce calcul est basé sur le repérage des contraintes non satisfaites. Dans NSGA II, on recherche les contraintes d'inégalités, dont les valeurs sont inférieures ou égales à zéro. Dans MULTIGEN, l'ajout des contraintes d'inégalité stricte implique la recherche des valeurs de contraintes négatives. Les contraintes d'égalité constituent un cas particulier : la valeur de dépassement considérée par MULTIGEN est l'opposé de la valeur absolue du dépassement des contraintes.

2.3.1.6 – Modification de la règle de domination sous contraintes

La règle de domination sous contraintes est basé sur trois conditions (voir description de NSGA II §2.3.1). Le cas où deux individus présentent le même degré de violation des contraintes n'est pas considéré. Ce cas se présente si deux clones sont comparés, ou si deux individus différents ont le même degré de violation. Le premier cas est résolu en évitant la

création des clones de façon préventive (voir §3.1.5), mais le second cas est possible, notamment si les violations de contraintes sont des entiers.

Dans ce cas, les individus seront comparés selon leurs critères uniquement, ce qui donne la règle suivante :

Un individu A domine B si et seulement si

1. A satisfait les contraintes et B non
2. A et B ne satisfont pas les contraintes mais le degré de violation des contraintes de A est moins fort que celle de B
3. A et B satisfont les contraintes et A domine B
4. A et B ont même degré de violation des contraintes, et A domine B

L'ajout du quatrième point permet de couvrir l'ensemble des cas de figure de domination possibles. L'ajout des variables entières et binaires rend nécessaire cette nouvelle règle alors qu'elle ne l'était pas dans la version originale de NSGA II : seules les variables continues étaient prises en compte et les valeurs des contraintes étaient également supposées continues. Aussi, le cas d'égalité du degré de violation n'était pas possible, sauf dans le cas où deux clones sont comparés : ceci constitue une faille majeure de NSGA II, corrigée dans MULTIGEN.

2.3.1.7 – Critère d'arrêt

La recherche d'un critère d'arrêt est essentielle pour toute méthode d'optimisation. Pour les algorithmes génétiques, l'arrêt de l'algorithme a lieu généralement lorsqu'un nombre maximal de générations est atteint faute d'autres critères plus pertinents. En observant l'évolution des solutions optimales, il est constaté avec regret que le nombre de générations nécessaires pour atteindre l'optimum est généralement bien plus faible que ce nombre maximal. Dans ce cas, un critère d'arrêt plus perspicace peut permettre de gagner du temps de calcul, véritable talon d'Achille des algorithmes génétiques, la littérature ne fournissant pas à notre connaissance de référence dans le domaine multiobjectif.

Dans le cas de non évolution du critère optimisation mono-critère, il est possible d'établir un seuil de convergence simple. Un tel seuil de convergence est impossible à mettre en place dans le cas d'une optimisation multicritère. Néanmoins, MULTIGEN est doté d'une procédure capable d'arrêter les calculs avant d'atteindre le nombre maximal de générations par comparaison du front de Pareto de deux populations. La méthode mise en oeuvre dans MULTIGEN propose de comparer deux populations entières sur une période P.

La méthode d'arrêt est la suivante (voir figure II-7) :

1. Les populations P_n et P_{n+P} des générations (n) et (n+P) sont générées
2. Les fronts de non domination de l'ensemble $P_n \cup P_{n+P}$ sont déterminés

- a. Cas 1 : l'ensemble $P_n \cup P_{n+P}$ donne un seul et unique front de non domination → arrêt de MULTIGEN
- b. Cas 2 : l'ensemble $P_n \cup P_{n+P}$ ne donne pas un seul et unique front de non domination → poursuite de l'optimisation

La période P, d'évaluation de la convergence est représentée par le paramètre *STAGTHRESHOLD* de MULTIGEN (voir détail [GOM08]) (contraction en anglais de « *Stagnation Threshold* » « Seuil de Stagnation »).

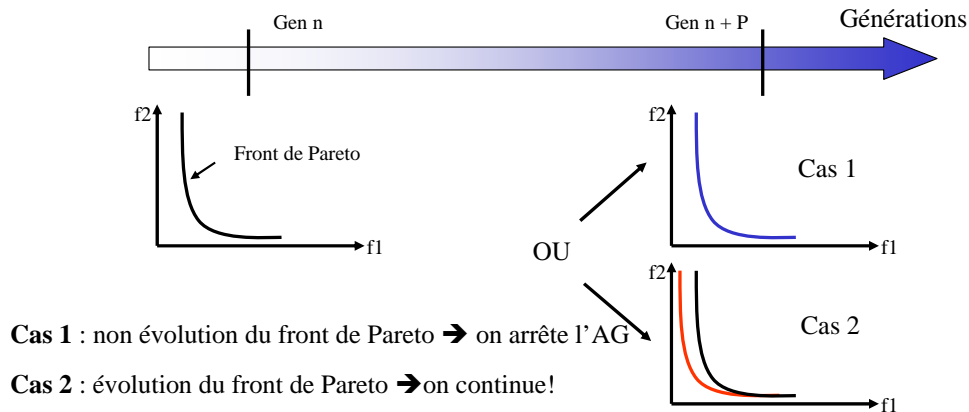


Figure II-7 – Cas d'évolutions des populations sur une période P

Le cas 1 représente la « convergence » de l'algorithme génétique car les populations sont, à la fois, réduites à un seul front et parfaitement confondues. Toutefois, cette condition n'est théoriquement pas valide car les populations peuvent stagner, si aucun nouvel individu n'apporte une amélioration, puis évoluer de nouveau. Ce cas est également rencontré en monocritère.

L'application de ce type de critère doit se faire en ayant à l'esprit que :

- La probabilité d'une telle convergence diminue quand la taille de la population augmente, quand le nombre de critères augmente, et quand le nombre de variables augmente.
- La probabilité d'une telle convergence augmente quand la fréquence du contrôle de la convergence augmente. Les générations peuvent stagner, avant de reprendre une évolution : une fréquence trop faible peut entraîner une convergence prématurée.

Toutes ces conditions font que la convergence est peu probable pour des problèmes complexes, mais la méthode présente un avantage certain : si le calcul des critères et des contraintes est impossible, dû à une défaillance dans l'appel ou le fonctionnement du modèle, les individus seront tous identiques ce qui va entraîner un arrêt automatique de MULTIGEN. L'utilisateur est donc plus rapidement informé qu'un problème de calcul existe dans les feuilles Excel.

2.3.1.8 – Option d'initialisation des populations

Trois types d'initialisation sont possibles (option STEP) :

- STEP = 0 : l'initialisation est entièrement aléatoire sur le domaine des variables. L'inconvénient de ce type d'initialisation est qu'il est possible que certaines zones soient peu explorées initialement, (voir figure II-8)

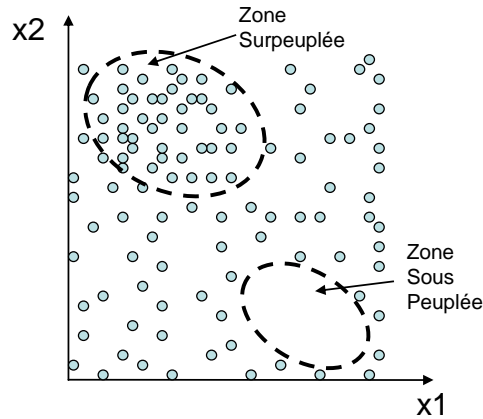


Figure II-8 – Répartition de la population initiale pour STEP = 0

- STEP > 0 : le domaine est découpé en morceaux de taille STEP.
- STEP < 0 : le domaine est découpé en -STEP morceaux.

Ces deux dernières options permettent de réaliser un quadrillage du domaine des variables d'optimisation (voir figure II-9), soit en fixant un pas (STEP > 0), soit en donnant le nombre de cellules de discrétisation (STEP < 0). Cette méthode d'initialisation permet une meilleure exploration du domaine des variables. Il est possible de donner une valeur différente de STEP pour chaque variable. Les individus sont créés aléatoirement autour de la grille, ce qui permet de conserver le caractère aléatoire de l'initialisation, tout en favorisant au maximum la couverture du domaine des variables.

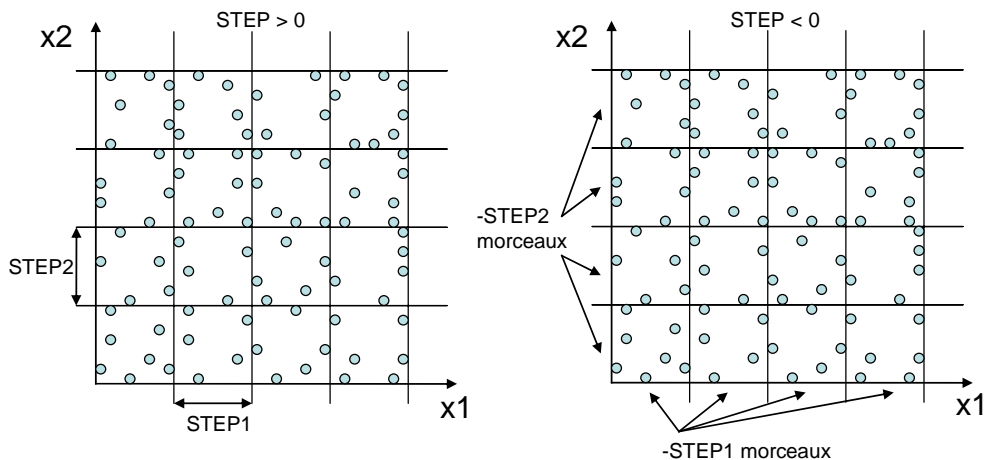


Figure II-9 – Répartition de la population initiale pour STEP > 0 et STEP < 0

2.3.1.9 – Développement d'une interface sous Excel

MULTIGEN utilise une barre d'outils spécifique qui s'ajoute aux barres par défaut d'Excel. Il y a trois phases principales dans le processus d'optimisation d'un problème à l'aide de MULTIGEN (voir figure II-10). La première étape implique la génération de l'interface qui permettra de coder le problème mathématique (figure II-11). La première colonne est constituée par des arguments clés. Ces arguments sont repérés lors de la phase de lecture du problème mathématique et permettent à MULTIGEN de pouvoir identifier les informations qu'il recherche : il est donc impératif de ne pas les modifier sous peine d'entraîner un message d'erreur de la part de MULTIGEN. Une fois l'optimisation terminée, les résultats sont générés sur la même feuille excel.

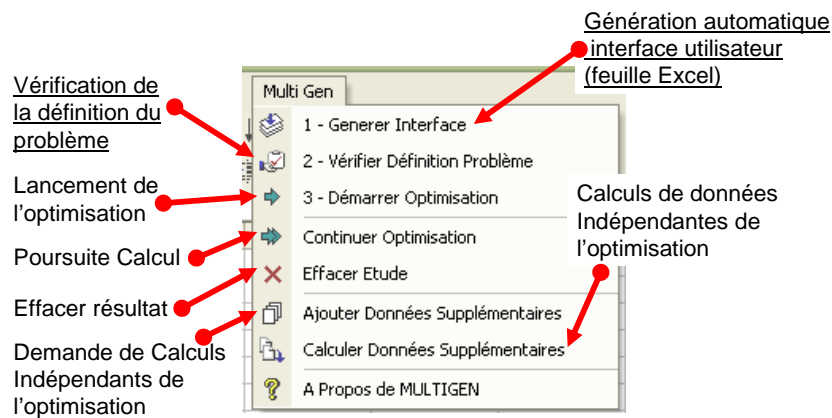


Figure II-10 – Barre outils Excel de MULTIGEN

L'utilisateur dispose de cellules spécifiques pour compléter l'information sur les fonctions objectif. Variables et contraintes peuvent être définies directement dans les cellules ou en faisant un lien avec la feuille qui contient l'information recherchée.

Mots Clés		Définition des Problèmes Mathématiques		
1	MULTIGEN			
2	NPOPULATION			
3	NGENERATION			
4	PRINTGENFREQ			
5	PRINTGENPERIOD			
6	Paramètres de l'algorithme:			
7	ALGORITHM			
8	PCROSS			
9	PMUT			
10	ETAC			
11	ETAM			
12	Paramètres supplémentaires de l'algorithme:			
13	PREC	1E-14		
14	STAGTHRESHOLD	50		
15	INFINITE VALUE	1E+14		
16				
17	Critères à optimiser:			
18		c1	c2	...
19	OBJECTIVE			
20	MINMAX			
21	Variables			
22	LABELS	v1	v2	...
23	CELLS			
24	TYPE			
25	MIN			
26	MAX			
27	STEP			
28	Paramètres supplémentaires des variables:			
29	LBC			
30	LBE			
31	LBC			
32				
33				
34	Contraintes:			
35		g1	g2	...
36	CONSTR>=0			
37		r1	r2	...
38	CONSTR>0			
39		h1	h2	...
40	CONSTR=0			
41				
42	Données:			
43		data 1	data 2	...
44	DATA			
45				
46				
47				
48				

Annotations de la figure :

- Paramètres de l'évolution : lignes 2 à 5
- Paramètres Algorithme : lignes 7 à 11
- Options : lignes 13 à 15
- Définition Critères : lignes 18 à 20
- Définition Variables : lignes 22 à 26
- Codage Structures : lignes 29 à 31
- Définition Contraintes : lignes 35 à 40
- Calculs Données : lignes 43 à 44
- Zone Extensible (taille problème) : lignes 18 à 40

Figure II-11 – Interface utilisateur MULTIGEN (feuille Excel)

2.3.2 – Développement d'algorithmes d'optimisation

2.3.2.1 – Algorithmes d'optimisation en variables continues

2.3.2.1.1 – Description des algorithmes

L'algorithme NSGA II SBX modifié (algorithme n° 2 de MULTIGEN) diffère de NSGA II uniquement par une différence de codage avec l'opérateur de croisement SBX original [DEB95]. Le croisement SBX modifié présente une probabilité de croisement donnée pour chaque gène, alors que l'opérateur implanté dans NSGA II a une probabilité globale de croisement (choisie par l'utilisateur), puis de 50% pour chaque gène par la suite. En conséquence, la version modifiée de l'opérateur SBX permet un meilleur brassage des gènes, mais induit une convergence plus lente de l'algorithme.

NSGA IIb (algorithme n°3 de MULTIGEN) met également en oeuvre le même algorithme que NSGA II, mais utilise un opérateur de croisement permettant d'éviter la création de clones (voir §3.1.5) : l'algorithme NSGA II original [DEB02].

Tableau II-2 – Algorithmes des opérateurs SBX et SBX modifiés

Croisement SBX NSGA II	Croisement SBX Modifié
If randNumber ≤ P(crossover) Then For i = 1 to m If randNumber ≤ 0,5 Then Call Gene_Crossover Else Next End If End For Else Exit End If	For i = 1 to m If randNumber ≤ P(crossover) Then Call Gene_Crossover Else Next End If End For

2.3.2.1.2 – Exemple de problème en variables continues

Le problème d'optimisation bicritère traité ici a été proposé par Tanaka [TAN95] (Problème « TNK »). Il est connu pour présenter une discontinuité du front de Pareto entièrement due à l'influence de la première de ses contraintes. L'expression du problème TNK est donnée par l'équation II-10. On remarque que les critères sont identiques aux variables.

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2) &= x_1 \\
 f_2(x_1, x_2) &= x_2 \\
 g_1(x_1, x_2) &= -x_1^2 - x_2^2 + 1 + 0,1 \cos[16 \times \arctan(x_1/x_2)] \leq 0 \\
 g_2(x_1, x_2) &= (x_1 - 0,5)^2 + (x_2 - 0,5)^2 \leq 0,5
 \end{aligned}
 \tag{II-10}$$

Pour résoudre ce problème, on utilisera la version originale de NSGA II. La figure II-12 permet d'observer l'évolution importante de cette population (100 individus), pour atteindre le front de Pareto à partir de 50 générations. On constate que le nombre de générations nécessaire est 10 fois inférieur au nombre de générations maximal imposé (500 générations) dans l'interface MULTIGEN.

La figure II-13 présente les fronts cumulés pour 5 optimisations successives (140 s par optimisation avec un processeur Inter Core 2 Duo, 2 Go de RAM). On observe les deux discontinuités caractéristiques du problème TNK :

- 1^{ère} discontinuité pour $f_1 = 0,93$ et $f_2 \in [0,195 ; 0,446]$
- 2^{ème} discontinuité pour $f_2 = 0,93$ et $f_1 \in [0,195 ; 0,446]$

Ce front obtenu avec MULTIGEN est en tout point identique à celui obtenu avec l'algorithme NSGA II de Deb et al. [DEB02].

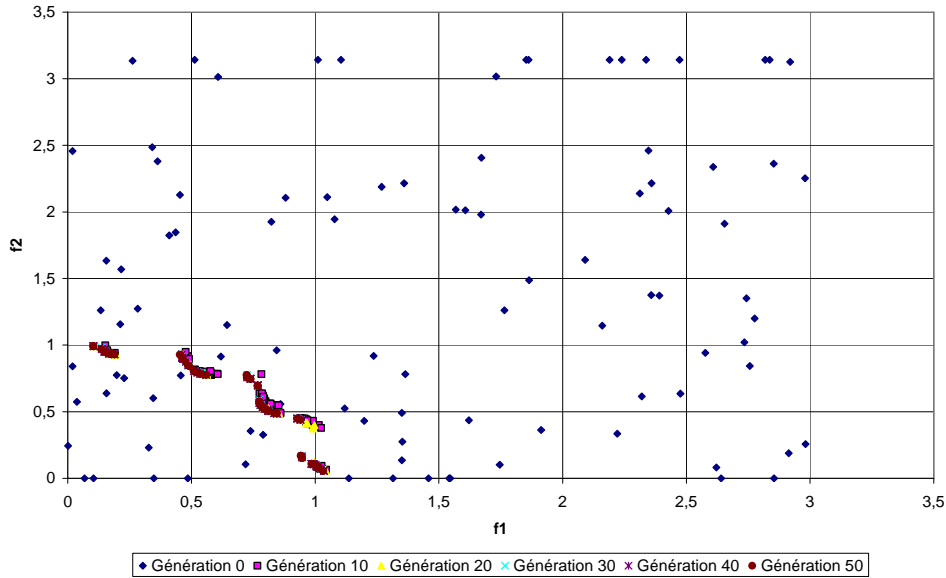


Figure II-12 – Évolution de la population sur les 50 premières générations pour le problème TNK

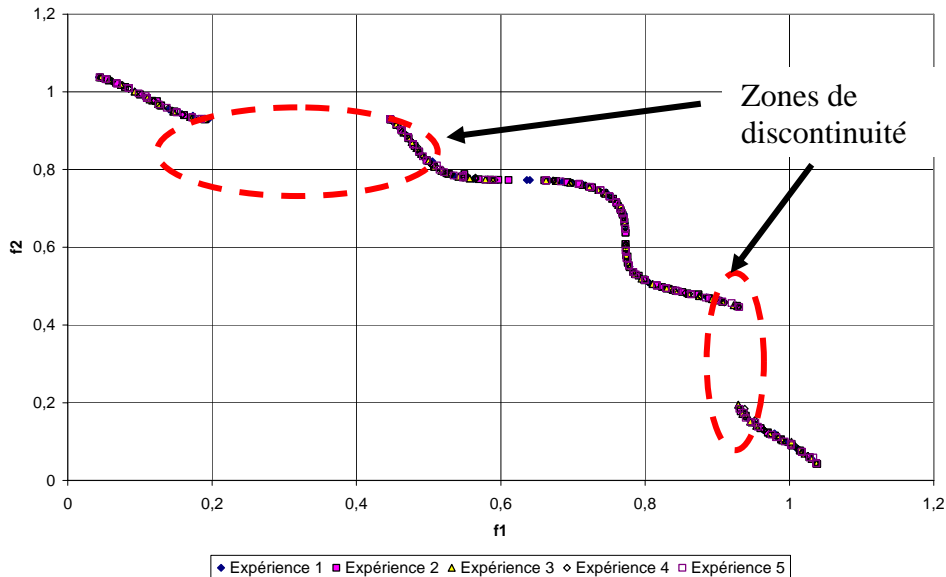


Figure II-13 – Front de Pareto pour le problème TNK

2.3.2.2 – Développement d'algorithmes en variables continues, entières et binaires

2.3.2.2.1 – Description des algorithmes

L'existence de problèmes mathématiques mettant en œuvre, à la fois des variables continues entières et binaires, est relativement fréquente. La bibliothèque d'opérateurs de croisement et de mutation implantée dans MULTIGEN permet de prendre en compte simplement les variables entières et binaires en modifiant les opérateurs conçus à l'origine pour les variables continues. Deux algorithmes, basés sur celui de NSGA II, ont été créés pour des variables entières, et entières-binaires.

2.3.2.2.2 – Exemple de problème en variables mixtes continue et binaire

Le problème bicritère proposé ici met en œuvre des variables continues et binaires. Ce problème, proposé par Papalexandri et Dimkou [PAP98] a été résolu par un algorithme d'optimisation paramétré en variables mixtes (pMINLP). Cet exemple est traité ici à l'aide de deux algorithmes : NSGA II Mixte Continu-Entier et NSGA II Mixte Continu-Entier-Booléen. Bien que l'algorithme NSGA II Mixte-Continu-Entier n'ait pas été conçu pour traiter des variables binaires, on l'utilise ici pour tester sa capacité à manipuler des variables binaires, qui sont un cas particulier de variables entières. En toute logique, on doit s'attendre à des performances inférieures à celles de l'algorithme mixte continu-entier-booléen. L'objectif est de mettre en évidence l'efficacité des opérateurs génétiques, implantés dans MULTIGEN, pour traiter des problèmes spécifiques.

L'expression du problème d'optimisation est formulée ci-après.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } f_1 &= x_1^2 - x_2 + x_3 + 3y_1 + 2y_2 + y_3 \\
 \text{Min } f_2 &= 2x_1^2 + x_3^2 - 3x_1 + x_2 - 2y_1 + y_2 - 2y_3 \\
 g_1 &= -3x_1 + x_2 - x_3 - 2y_1 \geq 0 \\
 g_2 &= -4x_1^2 - 2x_1 - x_2 - x_3 + 40 - y_1 - 7y_2 \geq 0 \\
 g_3 &= x_1 + 2x_2 - 3x_3 - 7y_3 \geq 0 \\
 g_4 &= x_1 + 10 - 12y_1 \geq 0 \\
 g_5 &= -x_1 + 10 + 2y_1 \geq 0 \\
 g_6 &= x_2 + 20 - y_2 \geq 0 \\
 g_7 &= -x_2 + 40 + y_2 \geq 0 \\
 g_8 &= x_3 + 17 - y_3 \geq 0 \\
 g_9 &= -x_3 + 25 + y_3 \geq 0 \\
 (x_1, x_2, x_3) &\in [-100;100] \\
 (y_1, y_2, y_3) &\in [-0;1]
 \end{aligned}
 \tag{II-11}$$

Le front de Pareto de la figure II-12a a été obtenue au bout de 500 générations (population de 100 individus) et a demandé 155 s de calcul pour un processeur Inter Core 2 Duo, 2 Go de RAM.

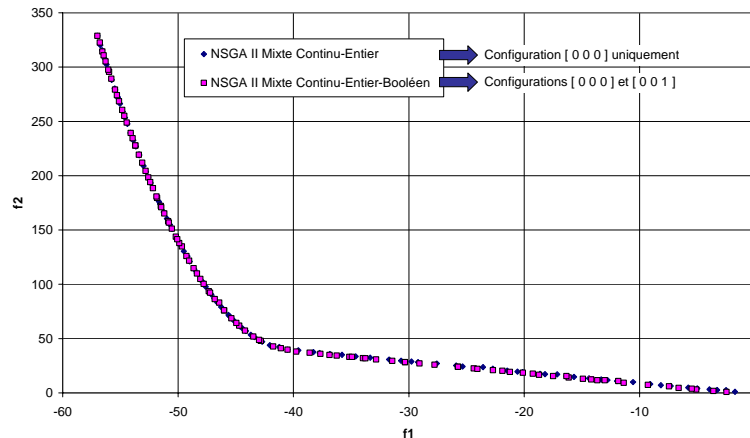


Figure II-14a – Front de Pareto pour le problème MINLP (Papalexandri et Dimkou [PAP98])

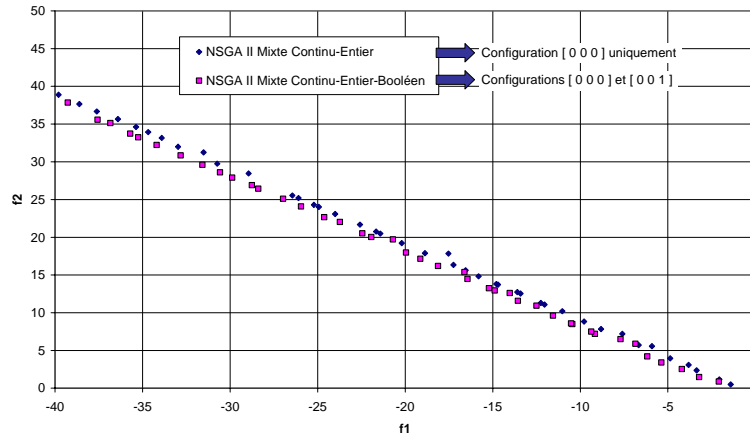


Figure II-14b – Front de Pareto pour le problème MINLP (Papalexandri et Dimkou [PAP98])

La figure II-14a présente les fronts de Pareto obtenu pour les deux méthodes d'optimisation : ces fronts sont similaires sur tout le domaine. La différence réside dans les variables binaires. L'algorithme NSGA II Mixte Continu-Entier n'est pas conçu pour traiter des variables binaires : l'ensemble des solutions du front de Pareto sont valables pour les variables binaires $(y_1, y_2, y_3) = (0, 0, 0)$. L'utilisation de l'algorithme NSGA II Mixte Continu-Entier-Booléen (algorithme 5) donne des solutions Pareto-optimales pour des variables binaires $(y_1, y_2, y_3) = (0, 0, 0)$ et $(y_1, y_2, y_3) = (0, 0, 1)$: l'utilisation d'opérateurs génétiques considérant les variables binaires permet d'obtenir plus de diversité sur les variables binaires. La figure II-14b est une représentation du front de Pareto pour f_1 compris entre -40 et 0. Dans ce secteur du front, on note que la différence entre les deux algorithmes est minimale. L'algorithme NSGA II Mixte Continue-Entier-Booléen est le seul capable de sélectionner la configuration (0, 0, 1) dans ce secteur, ce qui confirme la nécessité de choisir l'algorithme le plus adapté au type de variables traité.

2.3.2.3 – Développement d'un algorithme structurel : MIB MOGA

2.3.2.3.1 – Description des algorithmes

Les problèmes d'optimisation portant sur des structures sont difficiles à résoudre. Ces problèmes présentent très souvent un nombre de variables très important. L'exploration sur le domaine d'un certain type de variable (binaire par exemple) est d'autant plus importante que le nombre de variables d'optimisation de ce type est important. Deux voies sont envisageables pour envisager de régler ce problème : la première consiste à se doter d'une probabilité de croisement et mutation différente pour chaque type de variable, et la seconde de prendre en compte les liens entre variables binaires, entières et continues. La seconde voie est celle retenue pour les algorithmes de MULTIGEN. Des opérateurs spécifiques ont été développés au cours de cette thèse (voir §2.3.1.3).

Ces opérateurs prennent en compte la cascade de liens suivante :

1. LBE : binaires → entières,
2. LBC : binaires → continues,
3. LEC : entières → continues.

Cet enchaînement des liens permet de classer les individus par groupes d'individus ayant les variables binaires et entières en commun : ces groupes seront appelés « configurations » dans ce paragraphe. Le classement en groupes d'individus de même configuration revient donc à réduire l'espace de recherche aux seules variables continues, les variables entières et binaires sont traitées de façon exclusivement combinatoire. L'inconvénient d'une telle méthode est qu'il est nécessaire de générer toutes les combinaisons possibles de configurations avec un minimum d'individus pour chacune d'entre elles : les problèmes de grande taille nécessitent une population totale très importante. MULTIGEN génère des configurations différentes mais avec le même nombre d'individus.

Il faut également s'interroger sur les étapes clés, que sont la reproduction et la sélection des populations. La reproduction ne pose pas de problème fondamental car il s'agit de réaliser les croisements et mutations d'enfants issus de parents de l'ancienne population. On reprend d'ailleurs la même procédure que NSGA II [DEB02], mais la reproduction se fait uniquement entre individus d'une même configuration : le croisement entre individus de configurations différentes ne signifie rien. Lors de l'optimisation d'un procédé comprenant trois compresseurs, un croisement avec une solution à deux compresseurs n'a pas de sens ! Le croisement se fait, dans ce cas, uniquement sur les variables continues, mais chaque configuration possède un nombre différent de variables « actives », c'est-à-dire non neutralisées par les opérateurs de croisement et mutation des structures (voir §2.3.1.3). En définitive, chacune de ces configurations représente un problème mathématique différent, avec des solutions optimales différentes et une vitesse de convergence propre. Cette différence de vitesse de convergence doit pouvoir être gérée car elle peut être l'origine de la disparition de configurations optimales.

La méthode MIB MOGA (algorithme de MULTIGEN), développée au cours de la thèse, intègre des mécanismes prenant en compte toutes les difficultés citées ci-dessus.

L'étape de reproduction de MIB MOGA est celle de NSGA II [DEB02] pour chaque configuration. On produit alors une population globale de taille $2N$.

On donne les définitions suivantes pour les notions abordées pour cette étape :

- Définition 1 : une configuration est dite infaisable si le premier front de non-domination est composé d'individus dont les contraintes ne sont pas respectées.
- Définition 2 : une configuration stagne lorsque son 1^{er} front de non domination n'évolue pas sur un certain nombre de générations.

L'étape de sélection des survivants, pour ramener la taille de la population à N individus, est entièrement nouvelle. L'algorithme est le suivant :

- Phase 1 : élimination des configurations « faibles » (voir figure II-15)

On s'appuie ici sur le phénomène de stagnation des configurations. Pour chacune d'entre elles, on détermine leur faisabilité (voir définition 1). On contrôle ensuite si son 1^{er} front de non domination a dépassé le seuil de stagnation (on compare le 1^{er} front actuel avec le 1^{er} front du dernier contrôlé). Si tel est le cas, on vérifie si la configuration est faisable (voir définition 1) : si elle est infaisable elle est supprimée, sinon, on vérifie si son 1^{er} front est un front de Pareto. Si tel est le cas, on conserve cette configuration sinon elle est supprimée.

- Phase 2 : réduction de la population globale à N individus (voir figure II-16)

Après avoir supprimé la structure 4, la phase 2 a pour objectif de réduire la population à N individus. Chaque configuration ayant un nombre égal d'individus, il faut en supprimer un nombre égal : l'élimination de ces individus utilise le même principe de NSGA II [DEB02]. Pour chaque structure, on ajoute les fronts de non-domination jusqu'à atteindre le nombre maximal d'individus. Si l'ajout d'un front provoque un dépassement, on réalise un tri favorisant la diversité pour sélectionner les individus à conserver. Cette procédure est effectuée pour chaque configuration et permet de se ramener à une population totale de taille N . A l'itération suivante, lors de la phase de reproduction, la population de chaque configuration se verra augmentée, par rapport à la même étape à la génération précédente, du fait de la disparition des individus des configurations éliminées. Au fur et à mesure des générations, la population des configurations augmente du fait de la diminution du nombre des configurations : on améliore ainsi au fur et à mesure l'exploration des configurations.

L'efficacité de l'algorithme est liée à la valeur du paramètre de stagnation. Une valeur trop faible va induire l'élimination des configurations convergeant lentement, ce qui va aboutir rapidement à une solution locale du point de vue des structures. Si le paramètre de stagnation est égal au nombre maximal de générations, toutes les configurations seront explorées. La procédure d'élimination ne se fera qu'à la fin, mais la population totale sera très importante afin de garantir que la population de chaque configuration soit suffisante pour explorer correctement l'espace de recherche.

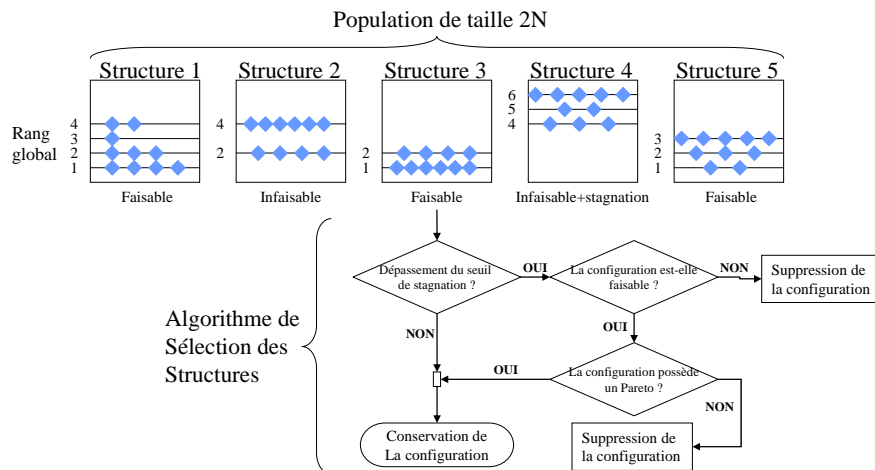


Figure II-15 – Algorithme de sélection des survivants (MIB MOGA) Phase 1

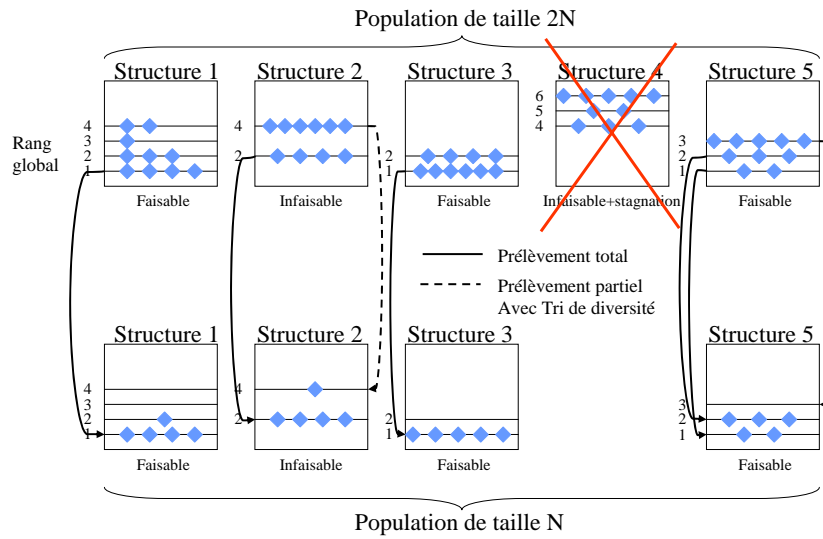


Figure II-16 – Algorithme de sélection des survivants (MIB MOGA) Phase 2

2.3.2.3.2 – Exemple de problème d'optimisation de structure

Ce problème traite de l'optimisation de la structure d'un procédé, ainsi que des spécifications du produit, en fonction de la demande du marché. Les changements sur le marché affectent la structure du procédé lui-même. Ce problème, traité par Kocis et Grossmann [KOS87], puis par Acevedo et Pistikopoulos [ACE96], consiste à minimiser le coût de production du produit C pour une demande du marché, notée D, donnée. La superstructure du procédé (voir figure II-17 et équations II-12) met en œuvre 4 opérations unitaires pour produire C. Une matière première A est transformée en un produit intermédiaire B à l'aide de trois procédés : P1 (débit A1 transformé en B1), P2 (débit A2 transformé en B2) et P3 (débit A3 transformé en B3). Une quantité limitée de produit B (débit Bf) peut être ajoutée aux quantités produites par P1, P2 et P3. Le procédé P4 permet de produire le produit C final. L'objectif est d'étudier l'impact de la demande du marché (D) sur la structure du procédé, la production de C et sur la consommation de matière première : on minimise ainsi le coût de production. Des variables binaires (y_1, y_2, y_3) sont utilisées pour représenter l'existence des composants P1, P2 et P3.

$$\begin{aligned}
 \text{Min Cost} &= 250A + 300B_f + (5A_1 + 15A_2 + 5A_3 + 15B) - 550C + 80y_1 + 130y_2 + 150y_3 + 100 \\
 \text{Min D} & \\
 h_1 &= C - 0.9B \\
 g_1 &= 18 \ln(1 + A_1/20) - B_1 \geq 0 \\
 g_2 &= 20 \ln(1 + A_2/21) - B_2 \geq 0 \\
 g_3 &= 15 \ln(1 + A_3/26) - B_3 \geq 0 \\
 h_2 &= A_1 + A_2 + A_3 - A \\
 h_3 &= B_1 + B_2 + B_3 + B_f - B \\
 g_4 &= 15 - B_f \geq 0 \\
 g_5 &= D - C \geq 0 \\
 g_6 &= 25y_1 - A_1 \geq 0 \\
 g_7 &= 20y_2 - A_2 \geq 0 \\
 g_8 &= 20y_3 - A_3 \geq 0 \\
 17 &< D < 25
 \end{aligned} \tag{II-12}$$

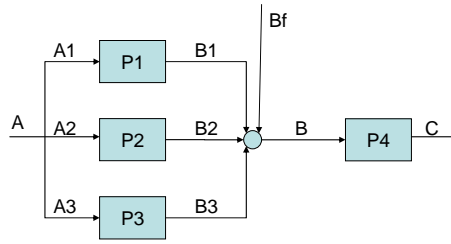


Figure II-17 – Schéma de la structure à optimiser

Selon Papalexandri et Dimkou [PAP98], il existe deux configurations optimales pour ce problème : $(y_1, y_2, y_3) = (1, 0, 1)$ pour $D \in [17, 20]$ et $(y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 0)$ pour $D \in [20, 25]$.

Les contraintes d'égalités h_1 , h_2 et h_3 par substitution des variables B , A et C qui disparaissent du jeu de variables de l'équation II-12. La contrainte g_4 est également supprimée car elle peut être directement considérée comme une borne maximale de la variable B_f . Dans un second temps, on va rechercher les fronts de Pareto de ces configurations en fixant les variables binaires pour chaque configuration : le problème devient purement continu ce qui rend possible l'utilisation de NSGA IIb. Les fronts de Pareto correspondant respectivement aux configurations $(1, 0, 1)$ et $(1, 1, 0)$ sont respectivement reportés sur les figures II-18a et II-18b.

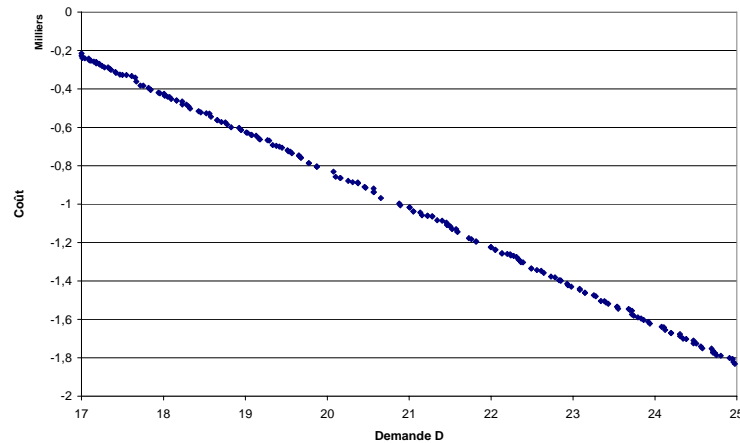


Figure II-18a – Front de Pareto pour la configuration (1 0 1)

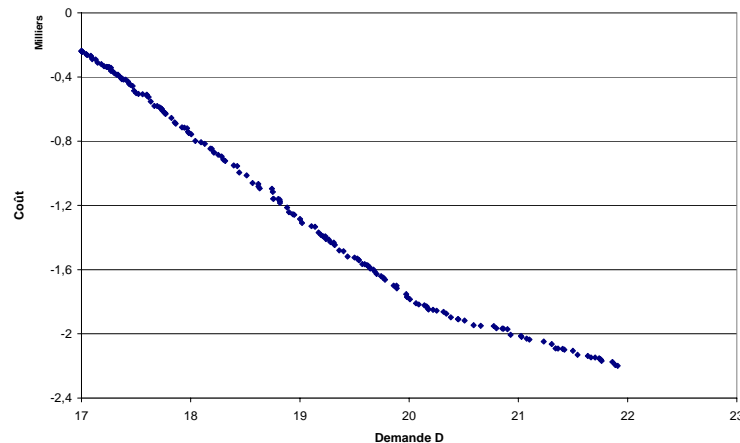


Figure II-18b – Front de Pareto pour la configuration (1 1 0)

La figure II-19a permet de constater que l'algorithme MIB MOGA permet de retrouver la configuration (1, 0, 1).

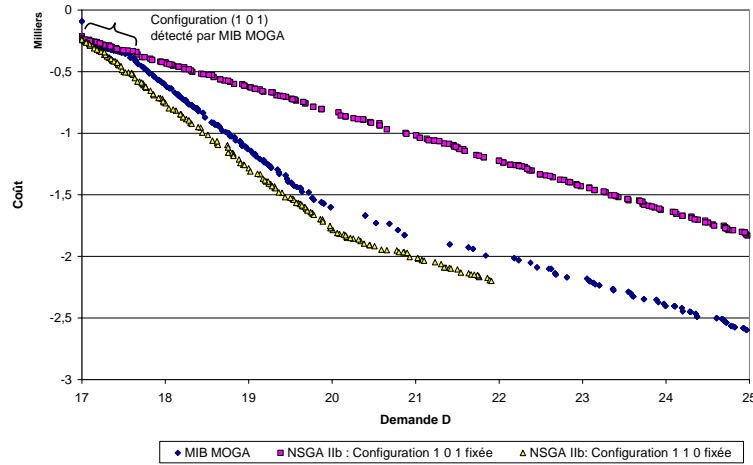


Figure II-19a – Front de Pareto pour le problème structurel

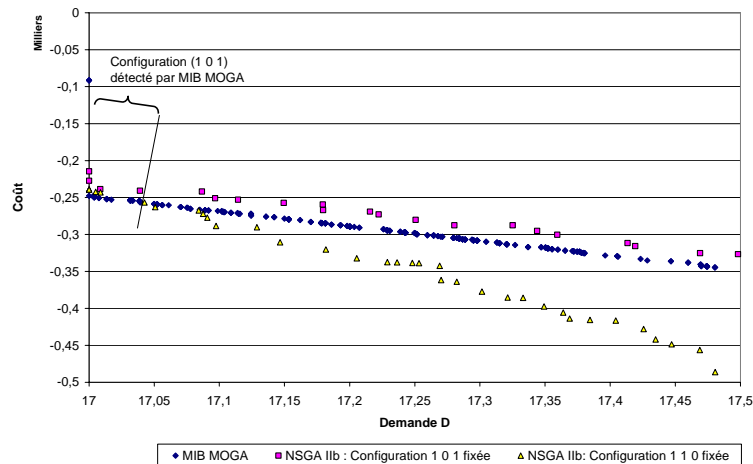


Figure II-19b – Front de Pareto pour le problème structurel

Les figures II-19a et II-19b permettent de visualiser les différences de convergence entre l'approche consistant à fixer les variables binaires (figures II-18a et II-18b) et la gestion des liens entre les variables binaires et continues (figure II-19a), proposée dans l'algorithme MIB MOGA. MIB MOGA fournit comme configuration optimale la solution $(y_1, y_2, y_3) = (1, 0, 1)$ pour $D \in [17 ; 17,54]$, et la configuration $(y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 1)$ pour $D \in [17,54 ; 25]$. La configuration (1, 1, 1) est atteinte dès la génération 300 : on rencontre ici une stagnation sur cette configuration.

Le front de Pareto fourni par MIB MOGA domine légèrement celui donné en fixant la configuration $(y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 0)$ pour $D \in [0 ; 17,04]$. En observant la figure II-19b : on peut considérer que les deux fronts sont confondus dans ce secteur. En revanche, le front de la configuration (1 1 0) domine nettement le front de MIB MOGA (figure II-19a) sur le reste du domaine de la demande D. En conclusion, MIB MOGA s'avère globalement moins

performant que les deux optimisations avec configuration fixée, mais possède la capacité de conserver les configurations optimales.

On donne, à titre indicatif, les conditions de calcul de chaque cas :

- $(y_1, y_2, y_3) = (1, 0, 1)$ fixée : 200 individus, 600 générations, 594 s de temps calcul
- $(y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 0)$ fixée : 200 individus, 600 générations, 855 s de temps calcul
- Optimisation par MIB MOGA : 600 individus, 1200 générations, 4806 s de temps calcul

Le temps de calcul pour MIB MOGA est très supérieur : il faut tenir compte du fait que les 8 configurations possibles ont été explorées alors que celles-ci ont été fixées dans les autres cas. Si l'on ramène le temps de calcul total de MIB MOGA au nombre de configurations explorées, on obtient une moyenne de 600 s par configuration. Ce temps de calcul est du même ordre de grandeur que celui des optimisations à configuration fixée (figures II-18a et II-18b).

Malgré son manque de précision sur les configurations sélectionnées dans cet exemple, MIB MOGA s'avère ici capable d'atteindre une configuration optimale sur deux, $(y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 0)$, puis une seconde (configuration $(1, 1, 1)$) relativement proche de l'optimalité.

Si MIB MOGA semble adapté à cet exemple, il est délicat de prédire son aptitude à résoudre des problèmes plus complexes. Chaque configuration étant un problème différent, leur vitesse de convergence est également différente : l'algorithme génétique doit éviter les niches structurelles, qui représentent des optimas locaux uniquement pour les variables binaires et entières. Des recherches destinées à établir les mécanismes évitant ce type de stagnation sont donc du plus grand intérêt.

2.3.2.4 – Récapitulatif du contenu de la bibliothèque MULTIGEN

Compte tenu de la diversité des problèmes, MULTIGEN présente des algorithmes capables de traiter plusieurs types de problèmes d'optimisation. Le tableau II-3 donne le domaine d'utilisation des algorithmes implantés.

Tableau II-3 – Domaine d'utilisation des algorithmes de MULTIGEN

Algorithme	Gestion Des Clones	Variable			Type de Problème Mathématique			
		Continu	Entier	Binaire	Continu	Mixte Entier-Continu	Mixte Entier-Continu-Binaire	Structures Mixte Entier-Continu-Binaire
NSGA II		X			X			
NSGA II SBX		X			X			
NSGA IIb	X	X			X			
NSGA II Mixte Continu-Entier	X	X				X		
NSGA II Mixte Continu-Entier-Booléen	X	X	X				X	
NSGA II Mixte Continu-Entier-Booléen LBCE	X	X	X	X				X
MIB MOGA Continu-Entier-Booléen LBCE	X	X	X	X				X

2.4 – Couplage MULTIGEN – outils CEA

2.4.1 – Objectifs généraux de couplage des outils

MULTIGEN est une bibliothèque destinée à traiter des problèmes d'optimisation complexes sous Excel ; l'objectif général est de réaliser des optimisations technico-économiques de systèmes différents.

Deux types de critères, au minimum, seront étudiés :

- Un critère purement énergétique capable de donner un indicateur de performance global du système : il sera précisé dans le Chapitre III et mis en œuvre dans le chapitre IV.
- Un critère purement économique prenant en compte l'investissement des composants, mais également les coûts opératoires tels que la maintenance.

Pour réaliser ces objectifs, les outils mis à disposition par le CEA sont les suivants :

- CYCLOP, simulateur des systèmes de conversion d'énergie, est conçu à l'origine pour simuler les cycles électrogènes. Il permettra également le calcul du critère énergétique

- COPERNIC, bibliothèque de feuilles Excel, permet le prédimensionnement des composants des systèmes. L'évaluation de leurs dimensions préliminaires, à l'aide des conditions opératoires fournies par CYCLOP, permet de calculer l'investissement. Le calcul du coût des composants s'appuie sur des modèles spécifiquement créés pour ces travaux.
- SEMER permet l'évaluation économique des installations nucléaires. Le code permet notamment d'évaluer les coûts de production de l'énergie à l'aide de corrélations validées sur le parc Réacteur à Eau Pressurisée (REP) français. SEMER utilise le coût d'investissement des systèmes, mais également des paramètres opératoires (fournis par CYCLOP).

Le système de cogénération (voir figure II-20) consiste à coupler un réacteur VHTR à une turbomachine en cycle direct, d'une part, et à un ensemble d'usines de production d'hydrogène (cycle Iode-Soufre) dont la demande thermique et électrique est connue. Dans le cas général, plusieurs types de turbomachines électrogènes doivent être étudiés. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation structurel serait donc nécessaire dans cette hypothèse.

L'optimisation technico-économique porte sur un site de 4 tranches autonomes, chacune comprenant un réacteur VHTR, une turbomachine et n usines de production d'hydrogène (figure II-18). L'excédent de production électrique est basculé sur le réseau. L'étude doit permettre d'établir les solutions de compromis (technico-économique) de production d'hydrogène et d'électricité. Dans ce cas, le nombre d'usines de production d'hydrogène est une variable d'optimisation supplémentaire, en plus de celles liées à la turbomachine. Ces variables d'optimisation de la zone optimisée seront définies plus précisément dans les chapitres III et IV.

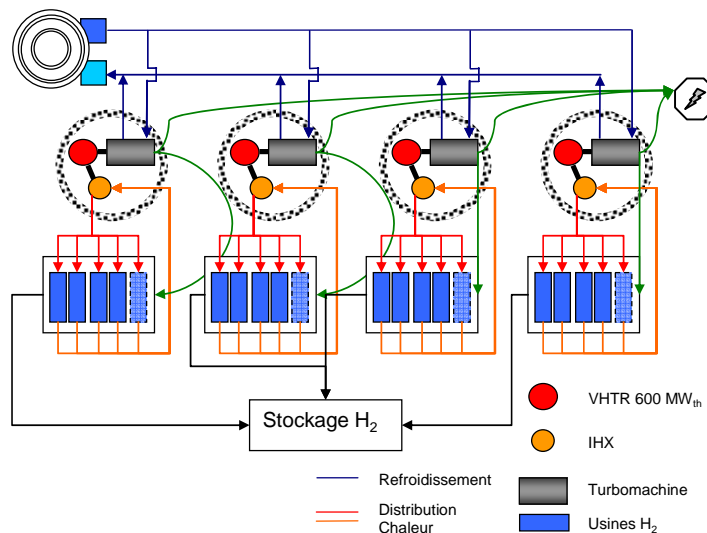


Figure II-20 – Schéma du site de cogénération optimisé (4 tranches)

Le couplage général des outils, représenté sur la figure II-21, met en œuvre les outils disponibles. Le paragraphe suivant va présenter un exemple illustratif de la faisabilité d'une

approche combinant une simulation CYCLOP, un prédimensionnement d'un composant seul avec COPERNIC, mais également une évaluation économique à l'aide d'un modèle simple.

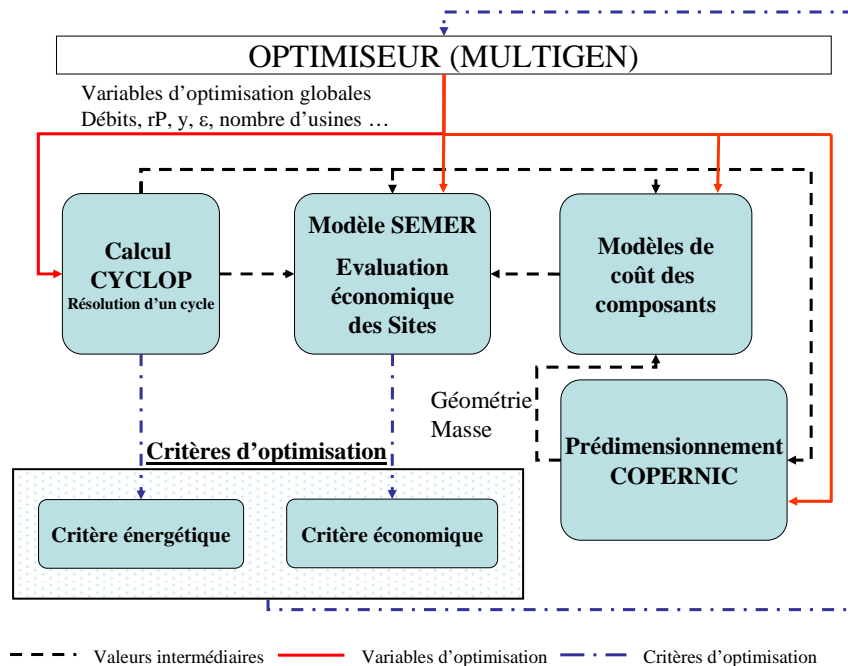


Figure II-21 – Couplage général des outils

2.4.2 – Application à un cas simple : optimisation d'une turbomachine électrogène.

2.4.2.1 – Description du problème

Afin de tester les capacités de MULTIGEN de traiter des couplages d'outils complexes sous Excel, on présente un exemple d'optimisation technico-économique d'une turbomachine électrogène, basé sur un cycle de type Brayton, couplé à un réacteur nucléaire. L'objectif est de réaliser également le prédimensionnement du récupérateur de chaleur. Cet exemple sera complètement traité d'un point de vue énergétique (Chapitre IV) et d'un point de vue économique (Chapitres V et VI) à l'aide de la méthodologie proposée.

Les outils mis en œuvre sont les suivants :

- Un modèle CYCLOP de la turbomachine.
- Un modèle économique simplifié du GT-MHR [MAN05], [MAN06].
- Un modèle de prédimensionnement COPERNIC [SAE05] modifié pour tenir compte des contraintes de dispositions décrite ci-dessous.

Le récupérateur de chaleur est constitué d'un ensemble de modules contenus dans un espace annulaire de 1,85 m de largeur et de 4,5 m de hauteur maximale. L'espace dédié aux tuyauteries de distribution et collecte doit être également pris en compte.

Les variables d'optimisation sont réparties en deux catégories :

- Les variables liées au cycle électrogène : taux de détente de la turbine, taux de compression du compresseur basse pression, l'efficacité de l'échangeur récupérateur,
- Les variables liées au dimensionnement du récupérateur de chaleur : le nombre de modules (entier), le nombre de motifs (entier), l'épaisseur des plaques (e_w) de séparation et des ailettes (δ), la hauteur des ailettes (h), la largeur des canaux (p).

Les critères d'optimisation retenus sont :

- Minimisation des pertes exergetiques. Ce critère sera présenté plus en détail dans le chapitre III et IV.

$$Ex_{Détruit} = \sum_i^{n_composants} Ex_{Détruit}^i + \sum_{i=1}^{nbr\ Sorties} q_i \times (h_i - T_0 \times s_i) - \sum_{j=1}^{nbr\ Entrées} q_j \times (h_j - T_0 \times s_j) \quad (II-13)$$

Avec :

$Ex_{Détruit}$: Destruction d'exergie du système (MW)

$Ex_{Détruit}^i$: Destruction d'exergie pour un composant i du système (MW)

q_i : Débit massique (kg/s)

h_i : Enthalpie massique (kJ/kg)

T_0 : Température atmosphérique (K)

s_i : Entropie massique (kJ/kg/K)

- Minimisation du coût total du système sur sa durée de vie (30 ans). Ce critère contient l'investissement et les coûts opératoires (chaleur nucléaire et maintenance). Le modèle économique est directement issu d'un modèle existant [MAN05].

$$CT = \sum_{t=1}^{T_i+T_e} \left\{ (C_{iTOR})_t + (C_{Op})_t + (C_{Maint})_t \right\} \times [1+I]^{-t} \quad (II-14)$$

Avec :

CT : Coût total du système sur sa durée de vie (M€)

T_i : Durée d'investissement (an)

T_e : Durée d'activité (an)

t : Année d'évaluation

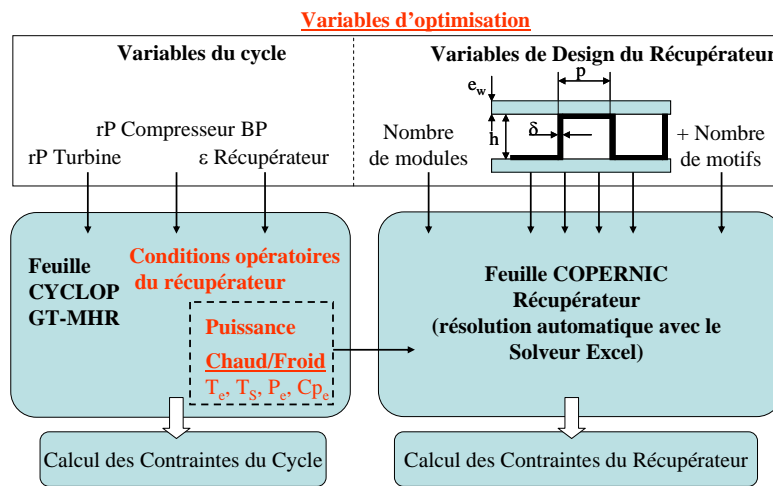
$(C_{iTOR})_t$: Coût de l'investissement total (M€an)

$(C_{Op})_t$: Coût de fonctionnement total (M€an)

$(C_{Maint})_t$: Coût de maintenance (M€an)

I : taux d'actualisation (%)

Dans un premier temps, le cycle électrogène est résolu à l'aide de CYCLOP, pour calculer les conditions de fonctionnement du récupérateur. Les températures et la puissance de l'échangeur sont fournies à la feuille COPERNIC. MULTIGEN contrôle les variables de dimensionnement du récupérateur. Puis la feuille COPERNIC est résolue automatiquement par le solveur Excel : le modèle de l'échangeur se réduit à une équation à une inconnue. Ce processus de calcul est représenté sur la figure II-22. Le problème formulé fait intervenir des variables continues et des variables entières. L'algorithme le plus adéquat est NSGA II Mixte Continu-Entier de MULTIGEN. L'optimisation utilise une population de 1000 individus sur 3000 générations. Les taux de croisement et de mutation sont respectivement de 90% et de 50%. Le calcul complet a nécessité 418 heures de calcul pour un PC équipé d'un processeur Pentium Core 2 Duo avec 2 Go de RAM.



Le temps de calcul du modèle, en moyenne de 0,5 secondes, peut remettre en cause l'approche globale de couplage des outils, décrite sur la figure II-21. Une deuxième optimisation est lancée en remplaçant le solveur Excel par une méthode de Newton implémentée dans la bibliothèque COPERNIC. Le « temps de calcul » total est ramené à 40 heures, soit une diminution d'un facteur 10, et le « temps calcul » du modèle de 0,048 seconde. En supposant que les modèles de prédimensionnement des autres composants de la turbomachine ont le même temps de calcul, le modèle est alors 6 fois plus complexe, donc son temps calcul est au minimum de 0,288 secondes, ce qui rend viable l'intégration du prédimensionnement des composants.

Comme l'illustre le changement de méthode de résolution, il est possible de gagner significativement du temps de calcul avec un minimum d'apport de développement.

2.4.2.2 – Résultat de l'optimisation

L'optimisation bicritère du modèle présenté ici est comparée avec les résultats de l'étude originale [MAN05]. La différence réside dans le mode de calcul du coefficient de transfert global du récupérateur de chaleur, permettant d'évaluer la surface d'échange. Selon l'équation II-15.

$$S_{Ech} = \frac{W_{Ech}}{U \times \Delta\theta_{ml}} \quad (II-15)$$

Avec :

S_{Ech} : Surface d'échange (m²)

$\Delta\theta_{ml}$: Température moyenne logarithmique (°C)

W_{Ech} : Puissance de l'échangeur (W)

U : Coefficient de transfert global de l'échangeur (W/m²/°C)

L'étude originale [MAN05] utilise un coefficient fixé à $U = 1000 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ et un coût surfacique de 1000 €/m^2 : ce coût est conservé dans la présente étude. COPERNIC permet d'accéder à une valeur plus rigoureuse du coefficient de transfert global, en utilisant la méthode du Nombre d'Unités de Transfert (NUT [B2342]).

Les fronts de Pareto pour les deux études sont représentés sur la figure II-23. Le prédimensionnement permet d'obtenir un front de Pareto dont les solutions présentent un coût total inférieur sur l'ensemble du domaine exploré, ce qui montre que l'approche consistant à pré-dimensionner le récupérateur de chaleur permet de réaliser un gain réel sur le coût total.

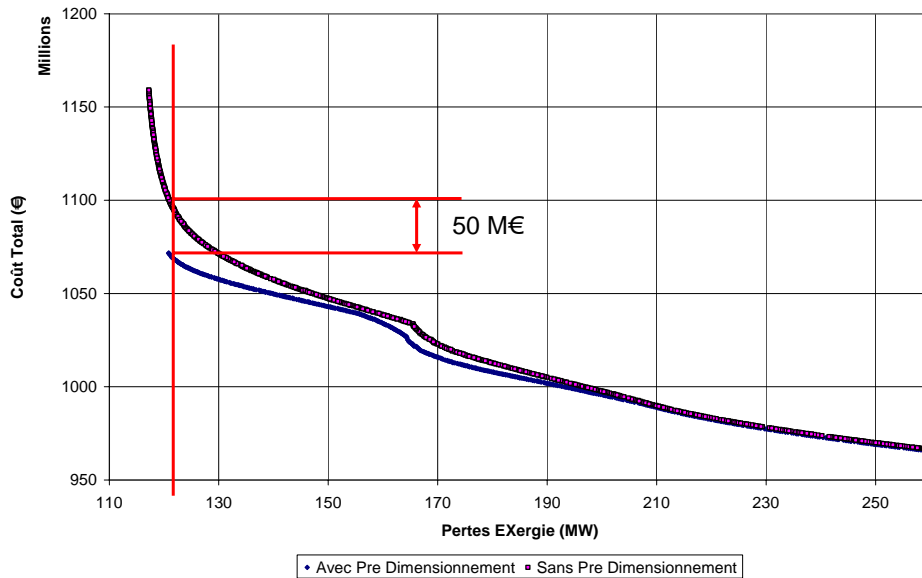


Figure II-23 – Influence du prédimensionnement sur le front de Pareto.

Ce front de Pareto est ensuite utilisé pour calculer le coût de production de l'électricité pour les deux approches (figure II-22) : l'équation II-13 permet de calculer le coût en €/kWh électrique. Le volume libre de l'espace annulaire est également représenté en fonction du rendement.

Il est à noter que le coût de production (figure II-24), dans le cas du prédimensionnement, est plus faible : on atteint une valeur de $0,036 \text{ €/kWh}$. Les coûts de production associés au prédimensionnement présentent un minimum à l'extrémité du front de Pareto : ce point correspond également à un minimum du volume libre dans l'espace annulaire contenant

l'échangeur. Les 20,5 m² restants ne peuvent plus être occupés par des modules d'échangeur : l'augmentation de la surface d'échange est donc stoppée. Le coût de production, sans le prédimensionnement du récupérateur, vaut 3,68 c€/kWh, soit une différence de 2,2%. Il est à noter que le prédimensionnement a permis de diminuer d'un facteur 2,8 l'investissement sur le récupérateur. Cette diminution est due essentiellement au mode de calcul du coefficient de transfert, avec un triplement de sa valeur.

Note importante : les coûts de production de l'électricité affichés sont donnés à titre indicatif. Aucune validation n'a été faite.

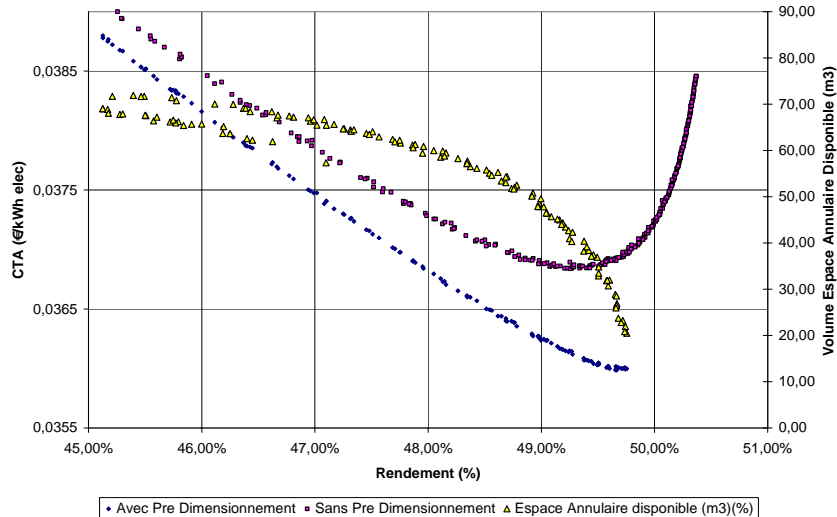


Figure II-24 – Influence du prédimensionnement sur le coût de production

2.5 – Conclusion

La conception de MULTIGEN a été effectuée en tenant compte des impératifs suivants : disposer d'une bibliothèque d'algorithmes génétiques mono ou multicritère, utilisables à partir d'une interface Excel simple et intelligible et traitant des problèmes contraints pouvant comporter des variables continues, binaires et entières. Le choix d'Excel et du langage VBA était une contrainte imposée par souci de compatibilité avec les outils CYCLOP, COPERNIC et SEMER développés par le CEA, et utilisés dans la suite de l'étude.

Cette bibliothèque est facilement extensible : ainsi, le code source est organisé en briques élémentaires (divers opérateurs de croisement et de mutation, gestion des clones, ...), avec une standardisation totale des sous-programmes, ce qui permet leur utilisation aisée dans les codes actuellement implantés, mais également dans de futurs algorithmes. Pour tenir compte, outre du caractère mono ou multicritère, mais également du type des problèmes (problèmes mathématiques ou optimisation de structures) et de la nature des variables (continues, entières ou binaires), sept procédures composent la bibliothèque. La gestion des clones évite leur accumulation dans les populations, afin de préserver au mieux la diversité génétique. Un critère d'arrêt, fondé sur la stagnation des fronts de Pareto complets, permet d'interrompre le

déroulement d'un algorithme génétique, avant que le nombre maximal de générations ne soit atteint.

L'utilisation de plusieurs types de variables a nécessité l'implémentation d'opérateurs génétiques appropriés à la nature diverse des variables. De plus, de nouveaux opérateurs ont été créés afin de pouvoir tenir compte des liens entre variables, qui apparaissent dans les problèmes d'optimisation de structures où certaines variables continues ou entières n'existent que si les opérations auxquelles elles sont liées existent également, ce qui est représenté par la valeur d'une variable binaire. Ces opérateurs spéciaux sont utilisés dans les algorithmes NSGA II Mixte LBCE et MIB MOGA conçus pour traiter des problèmes de taille raisonnable.

Dans la dernière partie du chapitre, MULTIGEN a été testé sur trois problèmes issus de la littérature : le premier étant continu, le deuxième mixte continu-binaire et le troisième relevant de l'optimisation de structures. La qualité des résultats obtenus valide MULTIGEN pour aborder les problèmes plus complexes des chapitres suivants.

Enfin, le problème de couplage de l'ensemble des outils à disposition a été défini précisément. Cette stratégie consiste à utiliser les résultats des simulations de CYCLOP, comme informations pour le prédimensionnement des composants. Ce dernier permet d'estimer les coûts des composants à partir desquels SEMER évaluera le coût de production d'un site nucléaire. Cette approche innovante a été mise en œuvre sur un cas d'une turbomachine, à l'aide d'un modèle économique simple.

CHAPITRE III

Analyse exergétique pour les systèmes de cogénération

3.1 – Introduction à la problématique

Dans le cadre de l'optimisation multicritère des cycles de conversion d'énergie, le choix d'un critère d'optimisation purement thermodynamique est nécessaire. La cogénération simultanée d'électricité et d'hydrogène pose le problème de l'expression d'un critère global de rendement. Il est en effet peu aisé de comparer l'énergie sous forme électrique et de potentiel énergétique de l'hydrogène, voire simplement de production de chaleur.

Dans l'industrie, la cogénération de chaleur, la plupart du temps sous forme de vapeur, correspond à la récupération thermique en sortie des cycles électrogènes (turbines à gaz, ...).

Dans un problème de cogénération tel qu'envisagé à partir d'une source nucléaire, la puissance thermique est utilisée simultanément par un cycle électrogène et par les usines de production d'hydrogène. La littérature, pour cette problématique, étant très limitée, il est donc nécessaire de revenir vers les concepts de base de la thermodynamique pour bâtir un critère énergétique cohérent.

Un raisonnement classique consiste à identifier, en vue de leur réduction, les pertes d'énergie au sein des appareils des cycles de conversion et à modifier tant les caractéristiques techniques des équipements (épaisseur de calorifuge, choix de nouvelles technologies, ...) que les conditions opératoires correspondantes. Au stade actuel, les appareils sont modélisés, en termes d'efficacité, de rendement et d'objectif de fonctionnement (taux de compression, pression d'entrée...): ces paramètres décrivent les conditions de fonctionnement du cycle complet, ce qui se traduit par un impact direct sur l'efficacité globale.

La quantification des pertes d'énergie doit à la fois tenir compte des pertes thermiques, à travers un taux de perte, mais également des créations d'entropie, irréversibilités ayant lieu lors de la modification de l'état des fluides (détente, compression, pertes de charges). On pourrait réaliser une optimisation simultanée des pertes enthalpiques et entropiques, mais il paraît plus judicieux de considérer la part réellement convertible de l'énergie en couplant les deux bilans, en considérant que dans tout procédé interviennent des échanges avec le milieu ambiant (atmosphère), état inerte. Ces réflexions nous amènent à faire intervenir la notion d'exergie.

L'objectif de ce chapitre est de bâtir, sur un fondement thermodynamique aussi rigoureux que possible, un critère énergétique unique permettant d'optimiser différents systèmes. Ces concepts seront appliqués dans le logiciel CYCLOP.

Ce chapitre se décompose en deux parties :

- La première est dédiée à la modélisation des pertes et destruction d'exergie sur les composants. Après une brève introduction au concept d'exergie, une écriture générale du bilan exergétique d'un composant quelconque est proposée. Les pertes et destructions exergétiques vers l'atmosphère sont modélisées. Deux sortes de pertes thermiques sont considérées, relatives d'une part aux composants, et d'autre part celles à travers les refroidisseurs des systèmes de conversion. Le transfert de chaleur dans les échangeurs est étudié afin de disposer d'un modèle

adapté à CYCLOP. Enfin, le potentiel exergétique de l'hydrogène est défini pour évaluer le rendement exergétique des usines de production d'hydrogène.

- La seconde partie traite du bilan exergétique du cycle Iode-Soufre afin d'établir son rendement.

3.2 - Modélisation de la destruction d'exergie sur les composants

3.2.1 – Introduction à la théorie de l'exergie

Quel que soit le système de conversion d'énergie mis en œuvre, le « travail délivré » constitue la part « consommable » de l'énergie primaire fournie au système. Cette énergie consommée est communément appelée exergie du système.

L'exergie appelée à l'origine « énergie utile » ou « énergie mécanisable » [SCO03] est issue du domaine des machines à vapeur (pistons, turbines). Les ingénieurs appelaient alors « énergie utile » la part de l'énergie vapeur disponible pour produire un travail, même si la vapeur est utilisée dans une machine à vapeur parfaite. Le terme « énergie utile » est parfaitement intelligible dans le cadre de la production d'énergie mécanique, mais ne l'est plus dès qu'il s'agit d'étendre le concept à des vecteurs énergétiques a priori sans rapport entre eux : hydrogène, électricité, carburants liquides, vapeur...

L'exergie est en fait la fraction maximale de l'énergie totale, que l'on peut extraire, pour produire un travail. Carnot avait découvert que la physique imposait une limite à la conversion de la chaleur, et envisageait « les machines parfaites, ou idéales ». L'adjectif « parfait » est très important : cette contrainte, imposée par la physique, est indépendante des imperfections des technologies utilisées. Ces imperfections technologiques sont des contraintes qui s'ajoutent aux limitations de la nature.

Finalement, l'énergie contient de l'exergie seulement si la source n'est pas en équilibre interne avec l'environnement : ce principe fondamental s'applique à tout système de conversion d'énergie et est gouverné par les lois de l'entropie. L'exergie représente donc le potentiel de conversion de l'énergie primaire. Cela paraît relativement facile à comprendre pour les machines thermiques, mais ne l'est plus pour des réactions chimiques, par exemple. Considérons le cas d'un carburant comme le méthane : lors de l'oxydation du méthane (combustion par exemple), sont produits de l'eau et du CO₂, qui font partie de l'environnement et qui ne peuvent plus être dégradés à leur tour. Le méthane n'est donc pas en équilibre chimique avec l'environnement car il émet son potentiel d'énergie lors de sa combustion.

La nature possède trois principaux modes de stockage de l'exergie [SCO03] :

- Non équilibre interne mécanique (potentiel gravitationnel, cinétique et différences de pression),
- Non équilibre interne thermique (différences de température),
- Non équilibre interne chimique (incluant l'électrochimie).

L'électromagnétisme (capacités) est également un mode de stockage, mais relativement marginal en terme de quantité, comparé aux autres. Dans le domaine nucléaire, la radioactivité de certains isotopes d'atomes traduit également le non équilibre de la structure du noyau de ces éléments, par rapport aux isotopes moins actifs : ce non équilibre est exploité pour produire de la chaleur.

En conclusion, l'exergie est la part de l'énergie en déséquilibre avec l'environnement ; la notion de « déséquilibre » étant à définir en fonction du type d'énergie (mécanique, thermique, chimique) mis en œuvre.

Dans ce paragraphe, on va s'attacher à formuler la notion d'exergie pour l'ensemble des problématiques envisagées : la production d'électricité, de chaleur et d'hydrogène.

3.2.2 – Bilan exergétique d'un système sans réaction chimique

L'étude de la performance d'un système de conversion passe par l'établissement d'un critère d'analyse de la performance d'un système. L'intérêt de tout système de conversion d'énergie est d'exploiter au maximum l'énergie « utile » disponible (chaleur à différentes températures, énergie électrique, mécanique ...). Il convient donc de définir ce que l'on entend par « énergie utile ».

La notion d'énergie utilisable a été pressentie par Carnot mais concrètement décrite par George-Louis Gouy en 1889 [GOU89]. La potentialité d'un système, du point de vue de la production de travail, peut être exprimée par une fonction contenant non seulement l'énergie interne du système, mais encore la température et la pression de l'atmosphère extérieure au système.

Afin de mieux en comprendre l'origine et la formulation, il convient d'appliquer le premier et le second principe à un système simple. Le système, représenté sur la figure III-1, est un système ouvert recevant de la chaleur de diverses sources chaudes, échangeant de la chaleur avec l'atmosphère et produisant de l'énergie sous diverses formes (chaleur à la température moyenne T_s , électricité, énergie mécanique).

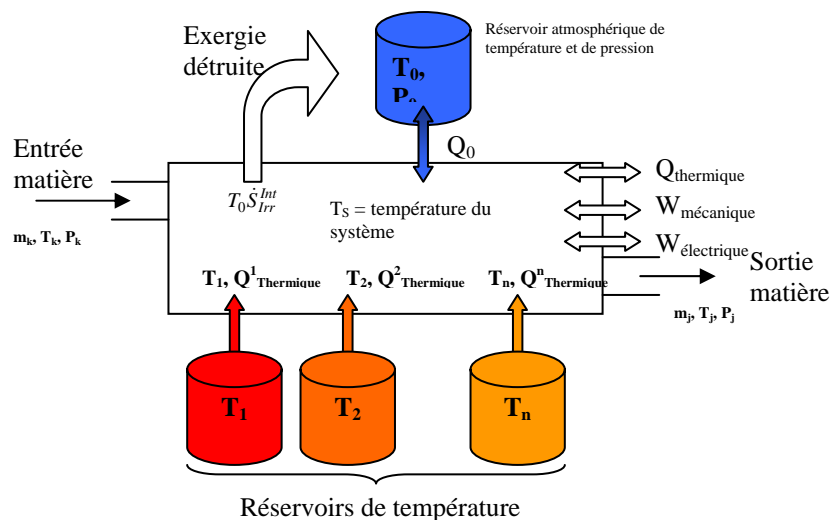


Figure III-1 - Bilan exergétique d'une machine thermodynamique générale

En respectant la convention des signes des grandeurs thermodynamiques, le bilan enthalpique s'écrit :

$$\left[\sum_{j=1}^{NS} m_j \cdot h_j \right]_{sortie} - \left[\sum_{k=1}^{NE} m_k \cdot h_k \right]_{entrée} = Q_{th} + W_{méca} + W_{elec} + \sum_{i=1}^{NSC} Q_{th}^i + Q_0 \quad (III-1)$$

Le bilan entropique est le suivant :

$$\dot{S}_{gen} = - \sum_{i=1}^{NSC} \frac{Q_{th}^i}{T_i} - \frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_{th}}{T_S} + \left[\sum_{j=1}^{NS} m_j \cdot s_j \right]_{sortie} - \left[\sum_{k=1}^{NE} m_k \cdot s_k \right]_{entrée} \quad (III-2)$$

Généralement, l'apport énergétique atmosphérique est nul, ainsi que son flux entropique associé : d'après le principe de Gouy [GOU89], l'apport utile de l'atmosphère est nul pour le système. En utilisant le vocabulaire de l'exergie, l'atmosphère a un potentiel exergétique nul car elle constitue l'état d'équilibre naturel ultime.

En éliminant Q_0 entre les équations III-1 et III-2 on obtient :

$$0 = Q_{th} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_S} \right) + W_{méca} + W_{elec} + \sum_{i=1}^{NSC} Q_{th}^i \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) - \left[\sum_{k=1}^{NS} m_j \cdot (h_j - T_0 \cdot s_j) \right]_{sortie} + \left[\sum_{k=1}^{NE} m_k \cdot (h_k - T_0 \cdot s_k) \right]_{entrée} - T_0 \cdot \dot{S}_{gen} \quad (III-3)$$

L'équation III-3 peut être réécrite du point de vue de la production d'exergie :

$$Q_{th} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_S} \right) + W_{méca} + W_{elec} = \left[\begin{array}{l} - \sum_{i=1}^{NSC} Q_{th}^i \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \\ - \left[\sum_{k=1}^{NE} m_k \cdot (h_k - T_0 \cdot s_k) \right]_{entrée} \\ + \left[\sum_{k=1}^{NS} m_j \cdot (h_j - T_0 \cdot s_j) \right]_{sortie} \\ + T_0 \cdot \dot{S}_{gen} \end{array} \right] \quad (III-4)$$

Pour les courants matière entrant et sortant, on définit l'exergie associée de la façon suivante :

$$e_k = h_k - T_0 \cdot s_k \quad (III-5)$$

Cette équation est généralement admise [BOR84, BEJ88] comme l'expression du bilan exergétique pour un système ouvert quelconque. L'équation III-4 est écrite ici dans le sens de la production d'énergie (thermique, mécanique et électrique) mais l'équation reste vraie quel que soit le cas de figure (système alimenté par de l'énergie mécanique ou électrique), car aucune limitation formelle n'existe. Chacun des termes est calculable dès lors que le système est connu.

D'un point de vue thermodynamique, l'expression du bilan exergétique contient davantage d'informations sur le système, par rapport à un bilan enthalpique seul, et permet de comparer les différents types de puissance sur une base commune.

L'analyse de l'équation III-4 permet de dégager quelques notions supplémentaires :

- Les énergies mécanique et électrique sont considérées comme de l'exergie pure.
- L'énergie thermique est considérée comme dégradée par un facteur de Carnot, sous sa forme d'exergie, en fonction de la température associée à la puissance fournie.
- Les courants matière peuvent représenter une source et une perte d'énergie pour le système étudié. Le mode de calcul de la température moyenne du système est détaillé dans le paragraphe (§5.2.4)
- Les irréversibilités internes (création d'entropie) sont des pertes sèches en termes d'énergie utile, et représentent un écart à l'idéalité.
- L'écart à l'idéalité, représenté par des créations d'entropie, doit donc être minimisé afin de maximiser la production d'énergie sous toutes ses formes.

Remarque : l'équation III-4 ne prend pas en compte les pertes thermiques vers l'extérieur : ce point sera étudié plus loin (§3.2.3.2).

Ce bilan est applicable à tout type de composant, (échangeur, compresseur, ...), mais doit également être utilisé sur un procédé à ses frontières : c'est notamment le cas de la chaleur rejetée vers le milieu extérieur (tours de refroidissement).

La prise en compte de l'efficacité des appareils dans la formulation de leur irréversibilité fait l'objet des paragraphes suivants. Pour les transferts thermiques, la définition des températures associées à ces flux est une problématique à elle seule et sera résolue pour chaque appareil. Les pertes thermiques dues aux boucles de refroidissement pourront être prises en compte dès lors que les débits et les conditions d'entrée et de sortie seront fixés.

3.2.3 – L'exergie comme quantification du potentiel énergétique d'un système : échanges à l'interface système – source froide

La notion de potentiel énergétique qui définit l'exergie est particulièrement mis en évidence à l'interface entre les cycles de conversion et leur source froide. L'objectif de ce paragraphe est de répondre à la question suivante : comment quantifier, à l'aide de la théorie de l'exergie, les pertes des systèmes de conversion d'énergie.

Ces pertes sont de deux types :

- Par refroidissement : elles sont inévitables car elles constituent le moteur de la conversion. Il est cependant souhaitable de les diminuer le plus possible.
- Par les parois des appareils : il s'agit simplement de l'isolation thermique. Cette fuite d'exergie doit être quantifiée en lui associant une température associée à la puissance perdue.

Ces deux types de pertes sont à considérer dans toute analyse de système (voir Chapitre IV §1.2), préalable à la phase d'optimisation.

3.2.3.1 Cas d'un refroidisseur dont la source froide n'est pas en équilibre avec l'atmosphère

Le cas d'un refroidisseur (figure III-2) dont la source froide (eau de rivière) a une température différente et inférieure, a priori, à celle de l'atmosphère est envisagé.

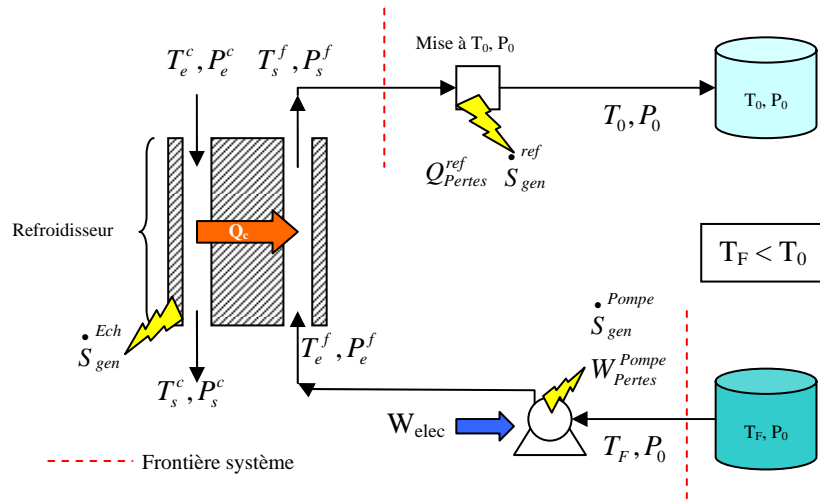


Figure III-2 - Refroidisseur échangeant avec une source froide atmosphérique

Le fluide de refroidissement (eau par exemple) est pompé et envoyé dans le refroidisseur. L'eau sortante est remise aux conditions atmosphériques en cédant une puissance Q_{Pertes}^{ref} et une entropie \dot{S}_{gen}^{ref} à l'environnement.

La somme des trois pertes/destruction exergétiques donne :

$$\dot{E}x_{Détruit}^{Total} = \underbrace{W_{Elec} - \dot{m}_f \times [h_f(T_e^f, P_e^f) - T_0 s_f(T_e^f, P_e^f)] + \dot{m}_f \times [h_f(T_F, P_0) - T_0 s_f(T_F, P_0)]}_{\text{Destruction Exergie Pompage}} + \underbrace{\dot{m}_f \times [h_f(T_s^f, P_s^f) - T_0 s_f(T_s^f, P_s^f)] - \dot{m}_f \times [h_f(T_0, P_0) - T_0 s_f(T_0, P_0)]}_{\text{Exergie Sortante}} + \underbrace{T_0 \times \dot{S}_{gen}^{Ech}}_{\text{Irréversibilités Echangeur}} \quad (III-6)$$

L'équation III-6 permet de faire apparaître le terme « d'exergie sortante » sous la forme d'un potentiel énergétique (par rapport à l'atmosphère) non exploité. Le fait que la température T_F de la source froide soit inférieure à celle de l'atmosphère crée un potentiel exergétique « négatif », moteur du transfert thermique.

Pour le cas particulier où la source froide est en équilibre avec l'atmosphère, soit $T_F = T_0$, l'équation III-6 se simplifie de la façon suivante :

$$\dot{E} x_{Détruit}^{Total} = \underbrace{W_{Elec} - \dot{m}_f \times [h_f(T_e^f, P_e^f) - T_0 s_f(T_e^f, P_e^f)]}_{\text{Destruction Exergie Pompage}} + \underbrace{\dot{m}_f \times [h_f(T_s^f, P_s^f) - T_0 s_f(T_s^f, P_s^f)]}_{\text{Exergie Sortante}} + \underbrace{T_0 \times \dot{S}_{gen}^{Ech}}_{\substack{\text{Irréversibilités} \\ \text{Echangeur}}} \quad (III-6)$$

3.2.3.2 – Prise en compte des pertes thermiques par le concept d'exergie

La prise en compte des pertes thermiques sur les appareils doit être étudiée car impliquant une diminution des capacités de travail et de transfert des fluides utilisés dans les cycles de conversion d'énergie : il en est de même sur les irréversibilités lors de réactions chimiques.

Les composants CYCLOP [HAU04] directement concernés sont tous les appareils impliqués dans un transfert thermique intrinsèque souhaité ou non (cas des pertes de chaleur).

Ces pertes peuvent être modélisées sous forme de rendement (au sens du 1^{er} principe) :

- Au niveau des composants CYCLOP,
- Au niveau des transferts thermiques entre composants (objet TRANSFERT de CYCLOP).

Physiquement, la chaleur perdue est en déduction, pour les flux de matières, en terme de travail potentiel récupérable : seuls les composants CYCLOP traversés par de la matière ont physiquement « le droit de perdre de la chaleur ». Ainsi, les pertes thermiques seront associées au niveau de température du fluide les subissant.

Écrivons donc les bilans enthalpiques et entropiques sur un exemple de pertes thermiques pour un échangeur de chaleur.

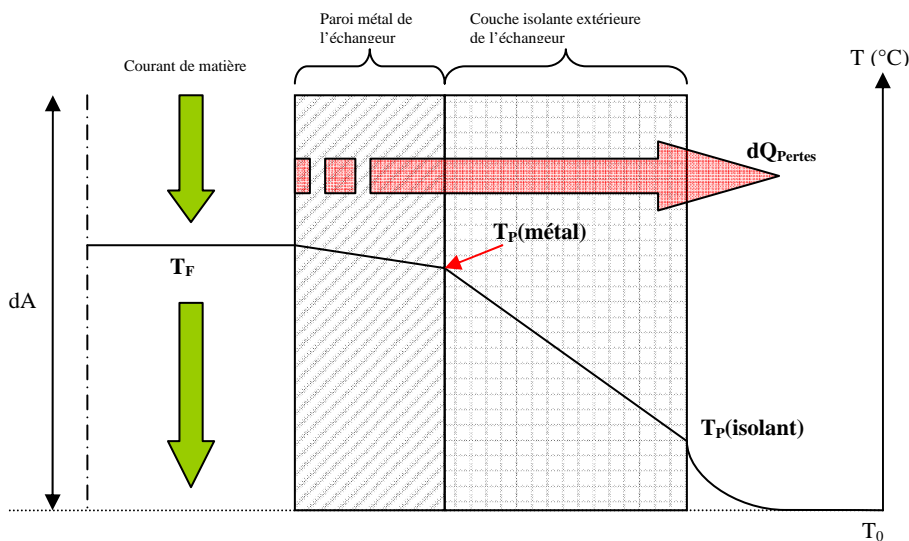


Figure III-3 - Pertes d'énergie à travers une paroi métallique et isolante d'un échangeur

Sur un élément de surface élémentaire dA (figure III-3) d'un échangeur de chaleur, on considère que le fluide subit une perte de chaleur dQ_{Pertes} , en traversant la paroi métallique puis la couche isolante.

Les principales hypothèses concernant les températures sont :

- une température radiale constante du fluide pour un écoulement turbulent. Les températures à l'interface entre le fluide et la paroi métallique sont donc identiques,
- les matériaux constituant la paroi métallique et la paroi isolante sont homogènes.

L'entropie étant une fonction d'état, l'évolution des températures dans les parois n'a aucun effet sur le bilan des flux entropiques.

L'application du principe de bilan exergétique (équation III-5), entre le fluide émetteur et l'atmosphère, donne la relation suivante :

$$\underbrace{dQ_{\text{Pertes}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_F}\right)}_{\text{Exergie perdue/détruite dans le fluide}} = \underbrace{dQ_{\text{Pertes}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_P^{\text{Isolant}}}\right) + T_0 \times (I_{\text{gen}}^{\text{Métal}} + I_{\text{gen}}^{\text{Isolant}})}_{\text{Exergie perdue/détruite par l'échangeur}} \quad (\text{III-7})$$

L'équation III-7 montre que les pertes thermiques impliquent une perte/destruction d'exergie qui peut être exprimée en fonction de la température du fluide « émetteur » du flux de chaleur uniquement. En absence de toute information autre que la puissance perdue (calculée par rendement de composant sur CYCLOP), l'exergie perdue par le système est égale à l'exergie perdue par le fluide, ce qui implique que le flux d'exergie perdue est fonction de la température du fluide émetteur.

3.2.4 – Modélisation d'un système fournissant de la chaleur : expression de la température moyenne du système

3.2.4.1 – Formulation générale et hypothèses

Sans réaction chimique au sein des systèmes, le problème de transfert thermique est toujours le même : un système chaud « émet » de la chaleur vers un système froid (tous deux étant traversés par des flux de matière subissant des variations de température et de pression) à travers une paroi matérielle (figure III-4).

Le transfert de chaleur étant dû aux gradients de température au sein des parois, on associe le plus souvent des températures moyennes aux systèmes qu'il faut définir.

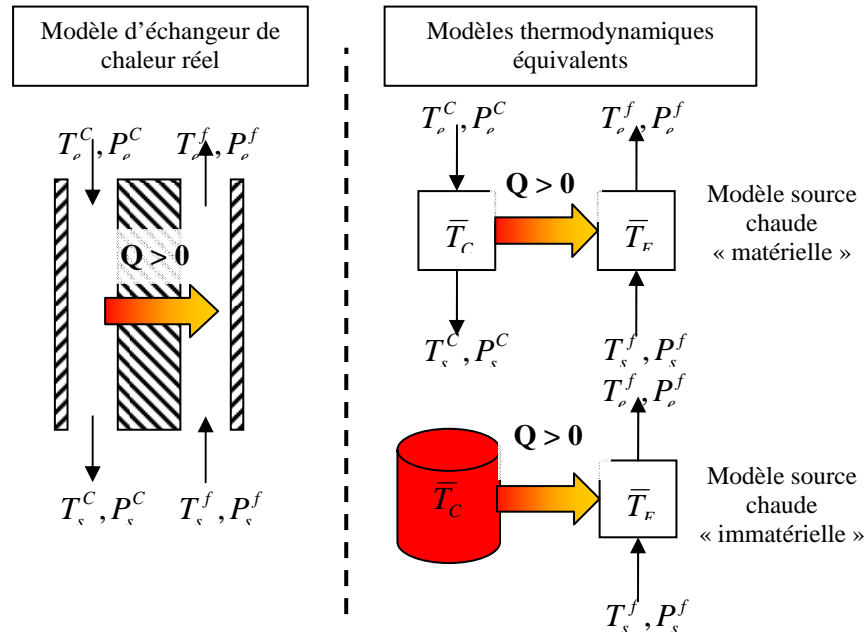


Figure III-4 - Modélisation d'un échange thermique dans la théorie de l'exergie

Prenons le cas d'un échange entre deux courants de matière, les hypothèses formulées sont les suivantes :

- Il n'y a pas de réaction chimique côté chaud ou froid,
- Sur une section de passage des fluide (côté chaud ou froid), les températures et les pressions sont homogènes (pas de gradients radiaux lors des transferts thermiques).

Sous ces hypothèses uniquement, est modélisé l'échange sur la figure III-4.

Ainsi le côté chaud de l'échangeur peut être modélisé comme un réservoir de température émettant la puissance Q requise, à une température \bar{T}_C : le calcul de cette température doit tenir compte de l'évolution des températures au cours de l'échange. Cette température est communément appelée « température entropique », et permet de réduire le côté chaud d'un demi échangeur en un réservoir de chaleur à \bar{T}_C constant.

3.2.4.2 – Expression de la température entropique : cas général

Le cycle de Lorentz ne prend pas en compte les pertes de charge dues aux surfaces d'échanges : dès lors, il y a génération d'irrégularités.

D'où la température entropique \bar{T}_C :

$$\bar{T}_C = \frac{\int_{T_e^c, P_e^c}^{T_s^c, P_s^c} Cp \cdot dT \left[v - T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp \right]}{\int_{T_e^c, P_e^c}^{T_s^c, P_s^c} \frac{Cp}{T} \cdot dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp} \quad \text{(III-8)}$$

Pour un gaz parfait, et en considérant Cp constant sur l'intervalle de température, on a :

$$\bar{T}_c = \frac{(T_e^c - T_s^c)}{\ln(T_e^c / T_s^c)} \quad (\text{III-9})$$

En considérant les pertes de charge, la température de sortie T_s^c est plus élevée, ce qui implique une diminution de la valeur de la température entropique \bar{T}_c . Cette formulation (équation III-9) a été implantée dans CYCLOP [HAU04]. C'est, à ce jour, la seule méthode de calcul de la température entropique d'échange utilisée pour les calculs automatiques des bilans exergétiques par composant.

3.2.5 – Notion de rendement exergétique

Le bilan exergétique met bien en évidence la notion de perte thermodynamique. Il permet donc de définir clairement la notion de rendement comme le rapport de l'exergie produite par le système à l'exergie fournie au système.

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_{Produit}}{\sum Ex_{fourni}} \quad (\text{III-10})$$

Les puissances exergétiques peuvent représenter un travail, un flux de chaleur ou de matière. Le bilan exergétique montre également que la différence entre le dénominateur et le numérateur du rapport η_{EX} (équation III-11) est rigoureusement égale aux pertes/destructions exergétiques du système.

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{N}}{\dot{D}} = \frac{\dot{N}}{\dot{N} + \dot{L}} = \frac{\dot{D} - \dot{L}}{\dot{D}} = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{D}} = 1 - \psi \quad (\text{III-11})$$

Le rendement exergétique est égal à 0 dans le cas où le système ne fournit aucune puissance exergétique. Il est égal à 1 si le système était parfaitement réversible. La définition du rendement exergétique est tout à fait adéquate pour caractériser le degré de perfection, c'est-à-dire la qualité thermodynamique d'une installation au sens de l'énergétique thermodynamique. Le rendement exergétique sera notamment appliqué pour quantifier l'efficacité des cycles électrogènes (voir Chapitre IV), les systèmes de distribution de chaleur et de production d'hydrogène, en considérant uniquement les flux entrant et sortant.

3.2.6 – Prise en compte du potentiel énergétique de l'hydrogène

L'hydrogène est produit par une usine (cycle Iode-Soufre, Électrolyse à Haute Température), et se présente comme une source d'énergie potentielle, à l'inverse de l'électricité. La perte/destruction d'exergie étant retenue comme critère, il est nécessaire de trouver une équivalence exergétique au Pouvoir Calorifique Supérieur de l'hydrogène, afin de tenir compte de l'énergie maximale récupérable par son oxydation. Afin d'être le plus général possible, on appellera « pouvoir énergétique » [BOR84] l'énergie libérée par la combustion complète d'un combustible quelles que soient les conditions.

Le Pouvoir Calorifique Supérieur correspond à la grandeur PCS lorsque l'eau contenue dans les produits de combustion se présente sous forme liquide à T_0, P_0 .

Le Pouvoir Calorifique Inférieur correspond à la grandeur PCI lorsque l'eau contenue dans les produits de combustion se présente sous forme gazeuse (vapeur d'eau).

La distinction entre pouvoirs énergétiques supérieurs et inférieurs n'intervient que pour les combustibles contenant de l'hydrogène ou de l'eau. La différence entre PCS et PCI est liée à la différence entre l'enthalpie de la vapeur d'eau et celle de l'eau liquide, c'est à dire :

$$[PCS - PCI](T_0, P_0) = h_v(T_0) - h_l(T_0, P_0) = q_{vap}^{H_2O}(T_0, P_0) \times \frac{M_{H_2O}}{M_B} \quad (III-12)$$

3.2.6.1 – Définition du pouvoir exergétique d'un combustible carboné

L'introduction à la notion d'exergie (voir §3.2.1), a mis en évidence le fait que les combustibles ne sont pas en équilibre chimique avec l'environnement.

La définition du pouvoir exergétique d'un combustible [BEJ88] est la suivante : Il s'agit du travail maximum récupérable, par mole de combustible, obtenu par oxydation si les réactifs et produits sont en équilibre chimique et thermomécanique (à T_0, P_0) avec le milieu ambiant.

Le travail maximum (c'est-à-dire réversible) récupérable sur une réaction chimique est la différence entre la somme du potentiel chimique des réactifs initiaux et la somme du potentiel chimique des produits terminaux.

Pour l'oxydation complète d'un combustible chimique quelconque, l'équation de la réaction est la suivante :



D'où l'expression du pouvoir exergétique :

$$W_{Reversible} = PEx = \mu_{C_\alpha H_\beta} + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \mu_{O_2} - \alpha \mu_{CO_2} - \frac{\beta}{2} \mu_{H_2O} \quad (III-14)$$

Avec :

$$\mu_{C_\alpha H_\beta}(T_0, P_0) = g_{C_\alpha H_\beta}(T_0, P_0) \quad (III-15)$$

$$\mu_{O_2}(T_0, P_0, x_{O_2}) = g_{O_2}(T_0, P_0) + RT_0 \ln(x_{O_2}) \quad (III-16)$$

$$\mu_{CO_2}(T_0, P_0, x_{CO_2}) = g_{CO_2}(T_0, P_0) + RT_0 \ln(x_{CO_2}) \quad (III-17)$$

$$\mu_{H_2O}(T_0, P_0, x_{H_2O}) = g_{H_2O}(T_0, P_0) + RT_0 \ln(x_{H_2O}) \quad (III-18)$$

Si le terme d'énergie de Gibbs de formation du combustible $\Delta G(T_0, P_0)$ est introduit :

$$\Delta G_{C_\alpha H_\beta}(T_0, P_0) = \underbrace{\alpha \cdot g_{CO_2}(T_0, P_0) + \frac{\beta}{2} g_{H_2O}(T_0, P_0)}_{\text{Produits}} - \underbrace{\left[g_{C_\alpha H_\beta}(T_0, P_0) - \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \times g_{O_2}(T_0, P_0) \right]}_{\text{Réactifs}} \quad (III-19)$$

Il en résulte la relation suivante :

$$W_{Réversible} = PEx = -\Delta G_{C_{\alpha}H_{\beta}}(T_0, P_0) + RT_0 \ln \left(\frac{x_{O_2}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}}{x_{CO_2}^{\alpha} \times x_{H_2O}^{\beta/2}} \right) \quad (III-20)$$

Le tableau III-1 regroupe quelques valeurs de pouvoirs exergétiques [MOR82] :

Tableau III-1 - Pouvoirs énergétiques de quelques combustibles fossiles à T₀ = 25°C et P₀ = 1 atm

Combustible	PCI (kJ/mol)	PCS (kJ/mol)	-ΔG(T ₀ ,P ₀) (kJ/mol)	PEx (kJ/mol)
Méthane (g), CH ₄	802,3	890,4	818,0	830,2
Éthane (g), C ₂ H ₆	1427,9	1559,9	1467,5	1493,9
Propane (g), C ₃ H ₈	2004,0	2220,0	2108,4	2149,0
Butane (g), C ₄ H ₁₀	2658,5	2878,5	2747,8	2802,5

3.2.6.2 – Pouvoir exergétique de l'hydrogène

Le tableau III-2 [MOR82] présente le pouvoir exergétique de l'hydrogène PEx, et les pouvoirs calorifiques supérieur PCS et inférieur PCI.

Tableau III-2 - Pouvoir calorifique et exergétique de l'hydrogène à T₀ = 25°C et P₀ = 1 atm

Pouvoir énergétique/exergétique	Valeur (kJ/mol)
PEx(H ₂)	235,3
-ΔG(H ₂)	237,2
PCS(H ₂)	285,9
PCI(H ₂)	241,8

La variation de l'énergie de Gibbs et le pouvoir exergétique de l'hydrogène est :

$$PEx_{H_2}(T_0, P_0) = -\Delta G_{H_2}(T_0, P_0) + RT_0 \ln \left(\frac{\sqrt{x_{O_2}}}{x_{H_2O}} \right) \quad (III-20)$$

Ce pouvoir exergétique sera utilisé dans le calcul du rendement du cycle Iode-Soufre.

3.3 – Pertes/destructions exergétiques pour la production d'hydrogène : application à une usine Iode-Soufre

3.3.3 – Production d'hydrogène de l'usine

La consommation et les pertes énergétiques décrites dans [LEY05] et [GOM08] sont valables pour une usine produisant 100 mol/s d'hydrogène. Le bilan exergétique global pour

l'usine de production nécessite l'étude des conditions d'entrée et de sortie des courants matières dans l'usine. Pour déterminer l'exergie associée à ces courants, il faut calculer les enthalpies et les entropies associées, en tenant compte de la composition des courants. Les caractéristiques des courants sont des données de fonctionnement du cycle Iode-Soufre [LEY05] : le bilan exergétique est détaillé en annexes.

Le calcul des exergies des courants entrée/sortie fait apparaître une fuite d'énergie de 5,56 MW (exergétique) non utilisée dans le procédé : il s'agit donc d'une perte thermique non récupérable. Pour considérer l'énergie potentielle de l'hydrogène produit, ce n'est pas le pouvoir calorifique supérieur qui est considéré, mais le pouvoir exergétique qui est pris en compte. Dans la théorie de l'exergie, la notion de pouvoir calorifique supérieur ou inférieur n'est pas utilisée. L'hydrogène fournit toujours la même quantité d'énergie utile appelée pouvoir exergétique : il est égal à 235,3 kJ/mol (25 °C, 1 atm).

Le pouvoir exergétique associé au courant d'hydrogène (100 mol/s) produit est donc de 23,53 MW d'exergie pour des conditions atmosphériques standard : 25 °C, 1 atm. L'impact de la correction de température et de pression pour ramener le courant de sortie aux conditions standard est négligeable, en effet, en considérant le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, 28,59 MW d'énergie sont produits mais non entièrement valorisables.

3.3.4 – Conclusion : pertes et rendement exergétiques du cycle Iode - Soufre

Le calcul des pertes et destructions d'exergie sur le cycle Iode est simple, pour une approche indirecte, sans calculer les pertes sur l'ensemble des composants individuellement. La perte/destruction d'exergie est égale à la différence entre l'exergie apportée au cycle (39,74 MW thermique et 10,04 MW électrique soit 49,78 MW exergétique) et celle récupérée de l'exergie potentielle de hydrogène, c'est-à-dire son pouvoir exergétique de combustion (soit 23,53 MW d'exergie) : **il en résulte une perte/destruction de 26,25 MW d'exergie sur le cycle Iode – Soufre.**

Le rendement exergétique peut en être déduit et vaut :

$$\eta_{Ex}^{IS} = 47,3\%$$

Cette valeur de rendement est du même ordre de grandeur que celle calculée [GOL06] (46%) mais la définition du pouvoir exergétique est différente. Le rendement calculé ici tient compte des conditions opératoires et besoins énergétiques fournis dans [LEY05].

Le même type de raisonnement peut être effectué pour d'autres procédés, à condition, comme ici, de connaître les puissances thermiques fournies (avec leurs températures associées), la puissance électrique fournie et la production d'hydrogène.

3.4 - CONCLUSION

L'application du bilan exergétique présente de nombreux avantages, dont le plus significatif, est celui de pouvoir comparer sur le même plan, diverses formes d'énergie (thermique, électrique et mécanique) par une prise en compte simultanée des 1er et 2ème principes de la thermodynamique. Le concept majeur de la théorie de l'exergie est la notion

de « potentiel énergétique » d'une source d'énergie. Les déséquilibres mécanique, thermique ou chimique sont à l'origine de ce potentiel exergétique : chacun de ces phénomènes a été défini dans ce chapitre, notamment pour le cas des sources froides.

La minimisation des pertes et destruction d'exergie va dans le sens d'une augmentation de l'efficacité des composants, soit au niveau des conditions opératoires (en agissant sur les débits, pressions et températures), soit au niveau des technologies, en agissant sur les créations d'entropie intrinsèques aux appareils (pertes de charges notamment). Cette dernière possibilité implique une augmentation du coût, indépendamment des conditions opératoires.

La théorie de l'exergie permet de comparer diverses formes d'énergies (électricité, chaleur, énergie mécanique, hydrogène) sur un même plan thermodynamique.

Si la production de chaleur et d'électricité peuvent être facilement considérées dans les bilans exergétiques, il faut prendre en compte l'hydrogène sur un plan identique et conforme à la théorie de l'exergie. L'hydrogène ne se présente pas sous forme d'énergie primaire (comme la chaleur ou l'électricité) mais sous forme de potentiel chimique exploitable qui, associé à son comburant oxygène, permet de délivrer une puissance maximale lors de sa combustion.

Le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène, utilisé en pratique pour calculer les rendements de production, est remplacé par le pouvoir exergétique : dans la théorie de l'exergie, il n'existe pas de notion de pouvoir supérieur et/ou inférieur pour un combustible. Chaque combustible, dont l'hydrogène, possède un et un seul pouvoir exergétique ce qui est compatible avec la théorie de l'exergie.

La flexibilité de la formulation du critère de minimisation de la création d'entropie permet à la fois des approches directes et indirectes. L'approche directe consiste à minimiser les pertes et destructions d'exergie internes et externes d'un système : c'est la voie adoptée pour les travaux d'optimisation de cycles électrogènes et de cogénération.

L'approche indirecte, inspirée de la notion de rendement exergétique, consiste à évaluer les pertes d'un système existant, simplement en calculant la différence entre l'exergie fournie au système et l'exergie produite : c'est le cas notamment pour le calcul du rendement du cycle Iode Soufre ou des différentes boucles de distribution de chaleur à l'étude.

CHAPITRE IV

Optimisation exergetique de la production d'électricité, chaleur et hydrogène

4.1 - Introduction

Le chapitre IV est consacré à l'application de la théorie de l'exergie dans la formulation du critère d'optimisation exergetique final.

Compte tenu de la diversité des expressions du bilan exergetique pour les composants de CYCLOP, il faut établir un bilan général pour le calcul des pertes/destructions exergetiques, et l'implanter au sein de CYCLOP pour automatiser le calcul du critère d'optimisation global. Deux niveaux sont impliqués : local au niveau des composants et global au niveau du système. La méthodologie de calcul du critère d'optimisation basé sur les pertes/destructions d'exergie est détaillée dans le premier paragraphe.

Ce critère est ensuite utilisé sur plusieurs exemples : les résultats sont présentés dans le paragraphe 4.3. Tout d'abord, le cas de l'optimisation du cycle direct type GT-MHR, couplé à un réacteur VHTR est traité par une analyse de sensibilité par rapport à des paramètres clés (efficacité isentropique, efficacité des échangeurs) avec une observation qualitative de l'évolution des coûts (modèles simplifiés). La répartition des pertes et destructions d'exergie sur le cycle électrogène combiné He/He-N₂/H₂O, sur la cogénération électricité-chaleur, puis électricité-hydrogène est étudié. Ces cas d'application vont nécessiter le couplage entre CYCLOP et MULTIGEN pour réaliser l'optimisation énergétique de ces systèmes. Ces analyses vont permettre d'identifier les variables d'optimisation pertinentes pour les études technico-économiques des chapitres V et VI.

4.2 – Formulation du critère énergétique

4.2.1 – Modèle généralisé de destruction d'exergie

Dans ce paragraphe, les hypothèses et les limites du calcul automatique du critère d'optimisation sont exposées. Il est à noter que l'expression du critère d'optimisation final, basé sur la minimisation des pertes/destructions d'exergie, dépend du système modélisé et notamment du devenir des formes d'énergie produites.

4.2.1.1 – Irréversibilités internes sur un composant

Au niveau d'un composant, une machine thermodynamique (figure IV-1) est supposée telle que :

- plusieurs courants matière entrent et sortent,
- plusieurs sources ou puits de puissance thermique échangent de l'énergie avec le composant,
- plusieurs sources ou puits de puissance électrique ou mécanique échangent de l'énergie avec le composant.

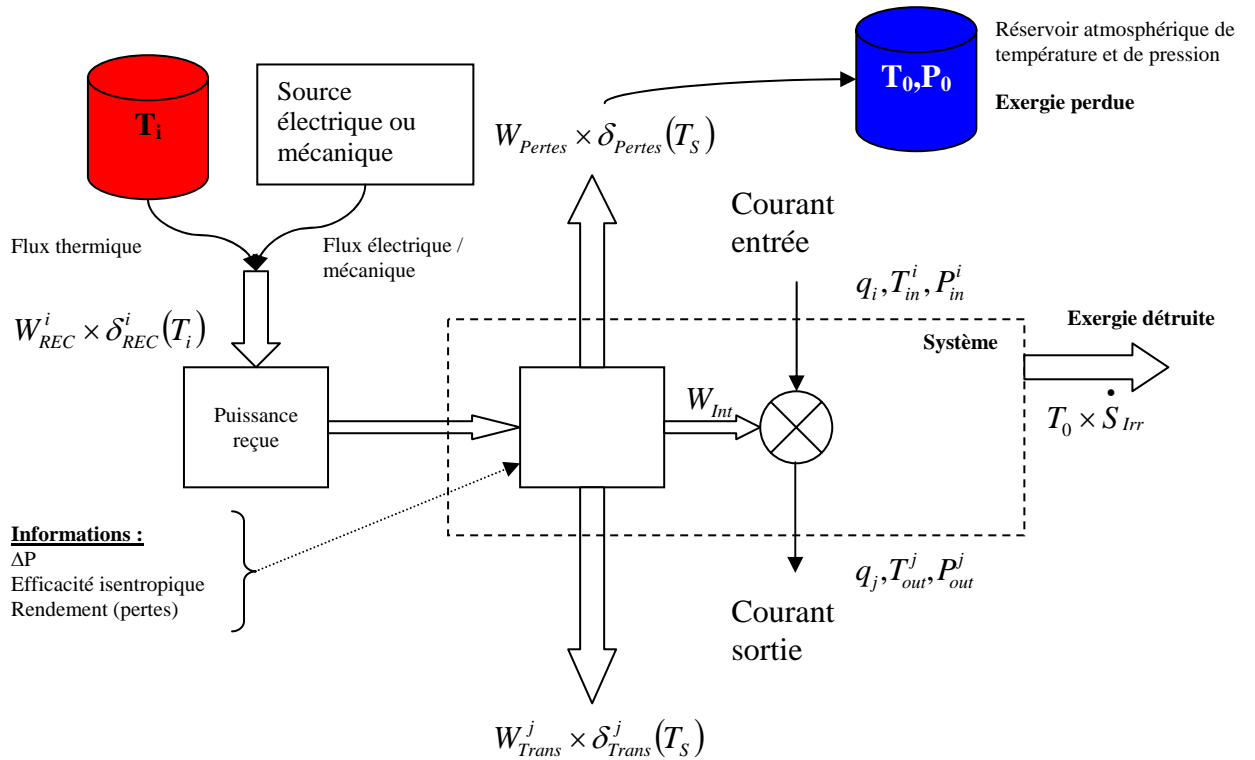


Figure IV-1 - Transformations de l'exergie au sein d'une machine thermique quelconque.

Les transformations au sein du composant induisent alors des pertes/destructions d'exergie (irréversibilités internes) qui doivent être minimisées.

Le bilan exergetique peut être présenté sous forme de trois équations :

- un bilan matière sur les courants,

$$T_0 \dot{S}_{gen}^{Courants} = \sum_i \dot{q}_i \times [(h - T_0 s)(T_{In}^i, P_{In}^i)] - \sum_j \dot{q}_j \times [(h - T_0 s)(T_{Out}^j, P_{Out}^j)] \quad (IV-1)$$

- un bilan sur les puissances électriques et mécaniques (exergie pure),

$$T_0 \dot{S}_{gen}^{elec/méca} = \sum_k W_{Rec}^k + \sum_l W_{Trans}^l + W_{Pertes} \quad (IV-2)$$

- un bilan sur les puissances thermiques.

$$T_0 \dot{S}_{gen}^{Th} = \sum_k W_{Rec}^k \times \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) + \sum_l W_{Trans}^l \times \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) + W_{Pertes} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \quad (IV-3)$$

L'énergie interne du système est une donnée déjà calculée par CYCLOP et s'exprime par :

$$W_{Int} = \sum_j \dot{q}_j \times h(T_{Out}^j, P_{Out}^j) - \sum_i \dot{q}_i \times h(T_{In}^i, P_{In}^i) \quad (IV-4)$$

Le bilan global des irréversibilités du système permet d'exprimer l'équation IV-5 qui présente l'avantage de limiter au maximum le nombre d'opérations mathématiques en

n'utilisant que des grandeurs calculées par CYCLOP lors de la résolution des systèmes. Il est en revanche nécessaire de préciser le type de transfert d'énergie, en distinguant les transferts d'énergie mécanique ou électrique d'une part, et les transferts thermiques d'autre part.

$$T_0 \dot{S}_{gen}^{Int} = +W_{Int} + T_0 \times \left[\sum_i \dot{q}_i \times s(T_{In}^i, P_{In}^i) - \sum_j \dot{q}_j \times s(T_{Out}^j, P_{Out}^j) \right] + \sum_k W_{Rec}^k \times \delta_{Rec}^k(T_k) \\ + \sum_l W_{Trans}^l \times \delta_{Trans}^l(T_S) + W_{Pertes} \times \delta_{Pertes}(T_S)$$

avec :

$$\delta_{Rec}^k(T_k) = \begin{cases} 1, & \text{si énergie électrique / mécanique reçue} \\ 1 - \frac{T_0}{T_k}, & \text{si énergie thermique reçue d'un réservoir à } T_k \end{cases} \quad (IV-5)$$

$$\delta_{Trans}(T_S) = \begin{cases} 1, & \text{si énergie électrique / mécanique transférée} \\ 1 - \frac{T_0}{T_S}, & \text{si énergie thermique transférée à } T_S \end{cases}$$

$$\delta_{Pertes}(T_S) = \begin{cases} 1, & \text{si énergie électrique / mécanique perdue} \\ 1 - \frac{T_0}{T_S}, & \text{si énergie thermique perdue à } T_S \end{cases}$$

L'équation IV-4 quantifie uniquement les irréversibilités internes. Dans le bilan global, il faut tenir compte à la fois des irréversibilités internes et des pertes vers le milieu extérieur. Ces pertes sont incluses dans l'équation IV-5, ce qui amène à écrire l'égalité suivante.

$$Ex_{Détruit / Perdu}^i = T_0 \dot{S}_{gen}^{Int} - W_{Pertes} \times \delta_{Pertes}(T_S) \quad (IV-6)$$

Cette formulation est la plus simple en pratique car elle intègre toutes les pertes sur un composant (interne et externe) et évite de faire une analyse supplémentaire, afin de rechercher les termes de pertes vers l'extérieur, dans le calcul des pertes/destructions d'exergie globales.

Il faut toutefois toujours quantifier le niveau de température sortant et connaître la puissance exergétique entrante : le niveau de température associé à la puissance importe peu, seule sa valeur absolue est nécessaire au calcul pour un composant (la température est calculée au niveau de l'appareil émetteur). L'objet « Transfert » (objet CYCLOP permettant de réaliser un transfert d'énergie entre deux composants) doit donc pouvoir véhiculer les puissances exergétiques en plus des puissances de type 1^{er} principe.

4.2.1.2 – Expression générale du critère d'optimisation des pertes/destructions d'exergie et application pratique au sein de CYCLOP

La perte/destruction d'exergie globale sur un système, quel que soit sa structure, est la somme des pertes et destructions exergétiques sur chaque composant à laquelle est ajoutée l'exergie cédée au milieu extérieur via des courants de matière (équations IV-6). L'ensemble de ces pertes/destructions doit être minimisé afin de maximiser la production d'énergie du système.

L'expression du critère global d'optimisation du système devient :

$$\dot{E}x_{Détruit / Perdue} = \sum_i^{n_composants} Ex_{perdue}^i + \sum_{i=1}^{NS} q_i \times (h_i - T_0 \times s_i) - \sum_{j=1}^{NE} q_j \times (h_j - T_0 \times s_j) \quad (IV-7)$$

L'expression du critère d'optimisation (équation IV-7) n'est pas directement calculée par CYCLOP. Il faut donc connaître les limites du logiciel CYCLOP, puis établir une démarche de correction manuelle du critère calculé automatiquement.

4.2.1.3 – Pertes/destructions exergetiques sur les objets « Transfert »

D'un point de vue général, les pertes/destructions d'exergie sur un objet « Transfert » sont égales à :

$$Ex_{\text{Détruit / Perdue}} = (1-r) \times \left[\sum_i W_i^{\text{méca}} + \sum_j W_j^{\text{élec}} + \sum_l W_l^{\text{Th}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_l} \right) \right]_{\text{entrée}}$$

$$Ex_{\text{Détruit / Perdue}} = \left[\sum_i W_i^{\text{méca}} + \sum_j W_j^{\text{élec}} + \sum_l W_l^{\text{Th}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_l} \right) \right]_{\text{entrée}} - \left[\sum_i W_i^{\text{méca}} + \sum_j W_j^{\text{élec}} + \sum_l W_l^{\text{Th}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_l} \right) \right]_{\text{sortie}} \quad (\text{IV-8})$$

Sous cette forme, l'équation IV-8 est un cas particulier de l'équation générale IV-6 et ne nécessite donc pas de modification de formulation. Dans le cas particulier des transferts de chaleur, une source de chaleur alimente plusieurs échangeurs.

4.2.2 – Méthode d'identification des pertes/destructions exergetiques : critère d'optimisation final à partir du calcul automatique par CYCLOP

La formulation des pertes/destructions exergetiques par composant permet, à l'aide du calcul automatique par CYCLOP, d'obtenir les irréversibilités internes du système étudié, y compris les pertes thermiques de composants. Il faut ensuite penser à comptabiliser les pertes énergétiques via les effluents (refroidissement), ou traiter le cas de la production de chaleur. Cette comptabilité se fait en 3 étapes :

- dans un premier temps, sont identifiés tous les courants (matière ou énergie) d'entrée et de sortie du système, puis on les classe en deux catégories :
 - les flux d'alimentation ou de production d'énergie, dans lesquels se trouvent notamment la source de chaleur (alimentation), la production d'électricité et de chaleur (cas particulier sous CYCLOP).
 - les flux non exploités pour la production d'énergie par le système : il s'agit principalement des courants de refroidissement entrant et sortant du système, ainsi que les puissances thermiques émises par les objets « Echangeur » de CYCLOP.
- dans un second temps, il faut analyser le mode de calcul des pertes/destructions exergetiques sous CYCLOP. Les pertes thermiques sont représentées de deux façons. La première consiste à définir directement dans l'interface CYCLOP ces pertes. La seconde est un cas particulier d'utilisation de l'objet « Echangeur » de CYCLOP : si la puissance extraite du courant n'est pas envoyée vers un autre objet « Echangeur », cette puissance est automatiquement comptabilisée (par défaut) comme une perte pour le système. Cela sera le cas pour les réseaux de distribution

de chaleur. Pour calculer la perte de l'objet « Echangeur », il faudra soustraire la puissance exergetique transmise aux pertes calculées par CYCLOP,

- enfin, dans un troisième temps, les pertes supplémentaires des courants non exploités sont ajoutées aux pertes calculées automatiquement par CYCLOP, pour obtenir le critère d'optimisation final.

La première partie est la plus complexe car elle oblige à identifier les flux entrant et sortant, puis à déterminer leur devenir (perte pour le système ou utilité à destination d'un autre système). Des exemples d'application de cette méthodologie seront exposés dans les paragraphes suivants.

4.3 – Application du critère d'optimisation

Pour illustrer l'application du critère d'optimisation, avant d'aborder la problématique de la production couplée électricité-chaleur-hydrogène, nous traitons le cas des cycles électrogènes et, plus particulièrement, deux dont la faisabilité a été examinée :

- le cycle direct GT-MHR,
- le cycle direct combiné He / He-N₂ / H₂O.

4.3.1 – Cycles électrogènes

Lorsqu'une seule forme d'énergie est produite, comme l'électricité par exemple, le problème est relativement simple. Les pertes/destructions d'exergie sont au nombre de deux : les irréversibilités internes et la puissance transmise à la source froide (refroidisseurs, condenseurs). Sur les deux exemples qui suivent, des pertes thermiques ont été estimées sur certains appareils (réacteur, générateur de vapeur) : l'expression de l'équation IV-6 est parfaitement adaptée à ce cas de figure, dès lors que la puissance perdue est définie. Ces pertes ne sont pas définies sur les composants, à l'aide d'un rendement, mais au niveau des transferts d'énergie. L'exergie perdue est un faible pourcentage de l'exergie thermique transmise du courant « chaud » (à une température moyenne) au courant « froid ». Ainsi, on considère implicitement, et mathématiquement, que le composant émettant la puissance thermique est celui qui perd la chaleur.

Dans le cas de la production d'électricité, la minimisation des pertes/destructions exergetiques revient à minimiser l'écart entre la puissance exergetique fournie par le réacteur et l'électricité produite, selon l'équation suivante :

$$Ex_{Détruit / perdue} = W_{Réacteur}^{Thermique} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_{Réacteur}} \right) - W_{Elec}^{Produit} \quad (IV-9)$$

Voyons maintenant un premier exemple d'application : la source chaude est un réacteur nucléaire VHTR de 600 MW de puissance thermique, délivrant en sortie de l'hélium (phase gaz) à une température de 950°C, 70 bar. La température en entrée est plafonnée à 480°C. Les conditions atmosphériques sont T₀ = 20°C et P₀ = 1 bar. On note également que la minimisation des pertes/destructions exergetiques est équivalente à la maximisation du rendement électrique si et seulement si la température de la source chaude est fixée.

4.3.1.1 – Cycle direct He type GT-MHR

4.3.1.1.1 – Description du cycle et optimisation

Il s'agit d'un cycle de Brayton modifié (figure IV-2). Une récupération de chaleur se fait en sortie de la turbine pour préchauffer le gaz caloporteur en entrée du réacteur. Le gaz subit deux compressions successives avec prérefroidissement : une compression à basse pression puis à haute pression. Le schéma du cycle direct GT-MHR (synoptique CYCLOP en annexes) est représenté ci-dessous.

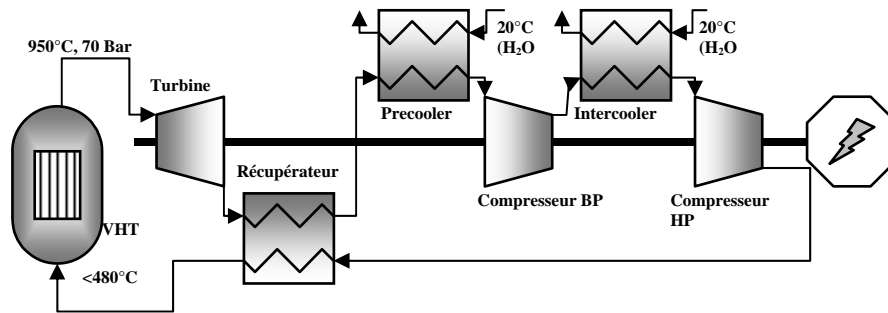


Figure IV-2 - Schéma du cycle électrogène direct GT-MHR

Les variables d'optimisation sont :

- le rapport de détente de la turbine,
- le rapport de compression basse pression.

Avant de débiter l'optimisation, il est nécessaire d'identifier les pertes/destructions exergétiques en utilisant la méthodologie décrite précédemment dans ce chapitre (§ 4.2.2). Sont ainsi identifiés :

- les flux d'alimentation et de production d'énergie : 600 MW_{th} issus du VHTR et la production électrique de sortie,
- les flux non exploités par le système pour la production d'énergie : l'eau de refroidissement.

Il n'y a pas d'exceptions induites par la modélisation du GT-MHR sous CYCLOP, qui nécessite un nouveau calcul des pertes/destructions d'exergie au niveau de chaque composant. Le travail de correction du critère est déduit : seule la variation d'exergie de l'eau de refroidissement est ajoutée au total des pertes/destructions exergétiques pour avoir le critère d'optimisation final dont l'expression est :

$$\dot{E}x_{Perdue}^{GT-MHR} = \underbrace{\dot{E}x_{Perdue}^{CalculAuto}}_{\text{Calcul CYCLOP}} + \underbrace{\Delta \dot{E}x_{H_2O}^{Coolers}}_{\text{Calcul Manuel}} \quad (IV-10)$$

Le cycle électrogène optimisé permet de produire 298 MW pour une perte/destruction totale d'exergie de 122 MW, ce qui correspond à un rendement exergétique de 71%. La figure IV-3 présente la décomposition des pertes et destructions exergétiques des composants. Les feuilles CYCLOP de résultat d'optimisation sont disponibles en annexes. Le tableau IV-1 rassemble les caractéristiques de fonctionnement des composants. Elles permettent de juger si

une solution optimale est techniquement faisable avec un coût acceptable (voir chapitres V et VI). Les résultats de cette optimisation constitueront la référence des conditions de fonctionnement des fonctions de coût du chapitre V. Le tableau IV-1 présente le résultat de l'optimisation.

Tableau IV-1 – Caractéristiques de fonctionnement des composants pour des pertes/destructions minimales d'exergie

Composant	Puissance (MW)	Efficacité (%)	Pertes de charge (bar) / rapport de pression	Température Maximale (°C)	Pression Maximale (Bar)
Turbine	578	93	x 3,549	950	70
Récupérateur	441	95	0,4 bar (chaud) / 0,4 bar (froid)	498	71,4
Precooler	159	95,4	0,4 bar (chaud) / 0 bar (froid)	152	19,3
Compresseur BP	131	88	x 1,927	128	36,5
Intercooler	130	94,4	0,4 bar (chaud) / 0 bar (froid)	128	36,5
Compresseur HP	139	88	x 1,98	133	71,4

Les pertes au niveau des refroidisseurs (46,5 MW d'irréversibilité sur les échangeurs) ainsi que la chaleur perdue (15,9 MW transmis à l'eau de refroidissement) vers le milieu extérieur représentent 51 % des pertes/destructions exergétiques totales du cycle. Au niveau de la détente, la turbine génère 14 % des pertes/destructions (16,9 MW exergie) puis 19,6 % pour la compression (23,8 MW exergie). Le reste, 15,5 %, représente les pertes thermiques sur le réacteur, sur l'alternateur et sur le réseau. Compte tenu des performances des appareils et du débit de refroidissement, le rendement obtenu ici est maximal.

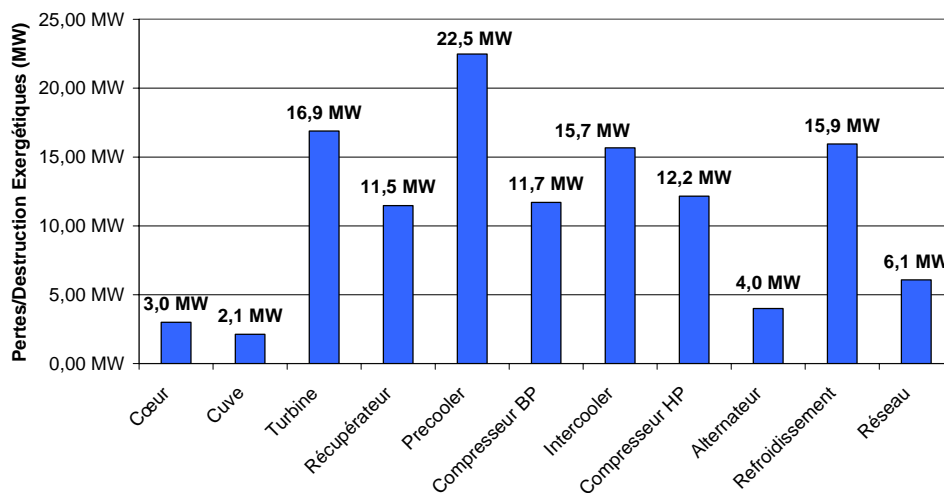


Figure IV-3 – Pertes/destructions exergétiques sur le cycle direct GT-MHR

Il serait intéressant de pouvoir agir sur les conditions de fonctionnement des refroidisseurs (efficacité et débit de refroidissement). L'ajout d'un critère économique, et

éventuellement de compacité, permettra de prendre en compte le surcoût engendré par l'amélioration des performances des appareils. De même, l'amélioration des performances et le surcoût des machines axiales (turbine, compresseurs) devront être étudiés.

Dans l'analyse de sensibilité suivante, l'impact des performances des appareils sur le critère de minimisation des pertes/destructions exergetiques a été examinée [GOM08], les principaux résultats sont données ci-après.

4.3.1.1.2 – Sensibilité du critère d'optimisation à l'efficacité des composants

L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence la sensibilité du critère d'optimisation basé sur la minimisation des pertes exergetiques. L'exemple du cycle direct GT-MHR est retenu. Les variables et contraintes sont ici identiques à celles déjà utilisées. L'expression détaillée des pertes exergetiques par composant (voir [GOM08]) montre que les variables suivantes permettent d'améliorer les performances de l'appareil et du cycle :

- l'efficacité isentropique de la turbine,
- l'efficacité du pré-refroidisseur de la turbine (*Precooler*),
- l'efficacité isentropique du compresseur basse pression,
- l'efficacité du refroidisseur intermédiaire (*Intercooler*),
- l'efficacité isentropique du compresseur haute pression,
- l'efficacité du récupérateur de chaleur.

Les valeurs numériques des études sont indiquées dans le tableau IV-2. Pour les compresseurs et les refroidisseurs, les variables évoluent simultanément.

Tableau IV-2 – Détail des études de performance des composants

Composant	Variable étudiée	Valeur de référence	Étude 1	Étude 2
Turbine	Efficacité isentropique	93 %	89 %	91 %
Récupérateur	Efficacité	95 %	91 %	93 %
Pré-refroidisseur	Température entrée compresseur BP	26°C	24°C	28°C
Compresseur BP	Efficacité isentropique	88 %	86 %	90 %
Refroidisseur intermédiaire	Température d'entrée compresseur HP	26°C	24°C	28°C
Compresseur HP	Efficacité isentropique	88 %	86 %	90 %

Pour les composants étudiés, des coûts d'investissement pour les appareils sont indiqués, afin d'étudier l'impact économique de leurs performances. Les fonctions de coût sont basées sur une étude technico-économique déjà menée au CEA [MAN05]. Le but n'est pas de réaliser une étude technico-économique complète mais d'estimer les ordres de grandeurs d'évolution de l'investissement de composants clés, pour des performances différentes. Ces

modèles ne seront pas utilisés par la suite pour les études présentées dans ce mémoire (chapitre VI), car elles sont issues de corrélations issues de la littérature de génie des procédés [CHA01, PET03], plutôt adaptées au contexte de la chimie industrielle. Les coûts calculés sont donc à considérer non en valeur absolue, mais en valeur relative. Les résultats présentés sont obtenus pour un cycle présentant une perte exergetique minimale, et sont comparés à ceux du cas de référence présenté dans le paragraphe précédent.

3.1.1.2.1 - Sensibilité à l'efficacité isentropique de la turbine

On étudie ici l'impact de l'évolution de l'efficacité isentropique de la turbine : 89% - 91% - 93% (figure IV-4). Les résultats montrent que les pertes exergetiques d'une turbine sont directement proportionnelles à l'efficacité isentropique des turbines. Globalement, sur l'exemple, l'augmentation de l'efficacité de 4% induit une diminution des pertes exergetiques de 11,3 MW. Le gain de production électrique est de 17,4 MW (280,5 MW pour une efficacité de 89% et 297,9 MW pour 93%) : l'amélioration de 4% de l'efficacité isentropique est à l'origine de 65% des gains de production. Le rejet thermique des refroidisseurs est diminué de 1,9 % (soit environ 11% des gains de production électrique). L'amélioration de l'efficacité de la turbine se répercute sur tous les composants suivants présents dans la boucle.

A titre indicatif, le coût de la turbine est fonction de la puissance : le coût se situe aux environs de 26,7 M€ pour une puissance d'environ 578 MW. La structure de la fonction de coût ne permet pas de refléter l'évolution technique entre les points extrêmes de l'étude. Deux possibilités sont à prendre en compte pour les études technico-économiques futures :

- utilisation de la formulation actuelle mais en fixant l'efficacité isentropique,
- utilisation de modules de prédimensionnement des turbines : ces modules ne sont pas disponibles à l'heure actuelle, mais pourraient prendre en compte l'efficacité isentropique comme variable d'optimisation. De plus, une formulation du coût de la turbine plus détaillée permettrait d'obtenir une optimisation plus pertinente.

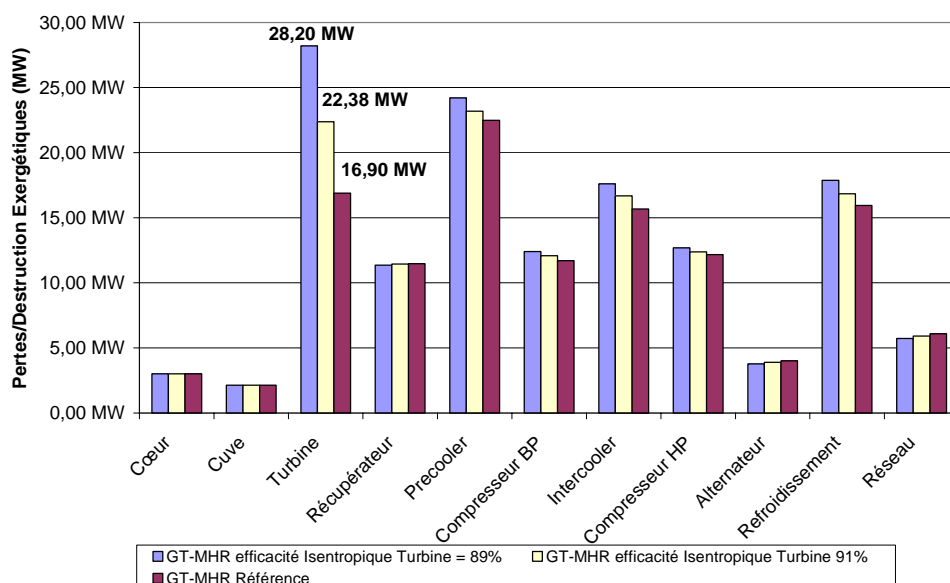


Figure IV-4 - Efficacité isentropique de la turbine sur les pertes d'exergie du cycle GT-MHR

3.1.1.2.2 - Sensibilité à l'efficacité isentropique des compresseurs

L'étude de l'impact des valeurs de l'efficacité isentropique des compresseurs basse et haute pression (figure IV-5) est faite pour les valeurs suivantes : 86% - 88% - 90%. On vérifie que les pertes exergetiques d'une turbine sont directement proportionnelles à l'efficacité isentropique des compresseurs. Globalement, sur l'exemple étudié, une augmentation de l'efficacité de 4% induit une diminution des pertes exergetiques de 11,4 MW. Le gain de production électrique est de 11,75 MW (291,9 MW pour une efficacité de 86% et 303,6 MW pour 90%) : l'amélioration de 4% de l'efficacité isentropique est donc à l'origine de 96,7% des gains de production.

Tout gain d'efficacité sur les compresseurs se traduit par une augmentation proportionnelle de la production électrique : l'augmentation de l'efficacité diminue la demande mécanique à travail égal sur le caloporteur.

Les rejets thermiques des refroidisseurs sont diminués de 1,3 % (soit 11% des gains de production électrique) : cette valeur est comparable à la diminution des rejets thermiques pour une augmentation de 4% de l'efficacité de la turbine.

Le coût des compresseurs diminue avec l'augmentation de l'efficacité, car il ne dépend que de la puissance. L'ordre de grandeur du coût des compresseurs est de 23 – 25 M€

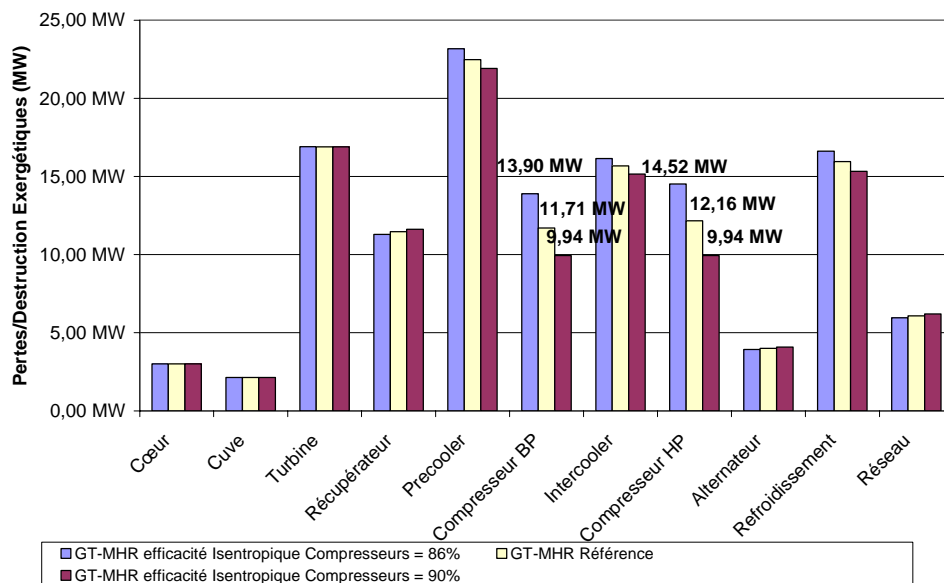


Figure IV-5 - Efficacité isentropique des compresseurs sur les pertes exergetiques du cycle GT-MHR

3.1.1.2.3 - Sensibilité à l'efficacité du récupérateur de chaleur

L'impact de l'évolution de l'efficacité du récupérateur de chaleur (91% - 93% - 95%, figure IV-6) est ensuite examiné. L'augmentation de l'efficacité de 4% induit une diminution des pertes globales du GT-MHR de 6,78 MW (6,13 MW pour le récupérateur seul). Le gain de production électrique est de 6,78 MW : l'amélioration de 4% de l'efficacité est à l'origine de 90,4% des gains de production d'électricité.

Le rejet thermique des refroidisseurs est diminué de 1,19 % (soit 17,6% des gains de production électrique).

En terme de coût, l'augmentation de l'efficacité de 4% induit une augmentation 11,1 M€ (pour une efficacité de 91%, le coût représente 12,8 M€ et atteint 23,9 M€ pour 95%).

Le récupérateur de chaleur apparaît donc comme un composant clé où un compromis efficacité-coût aura un impact sur le coût de production de l'électricité.

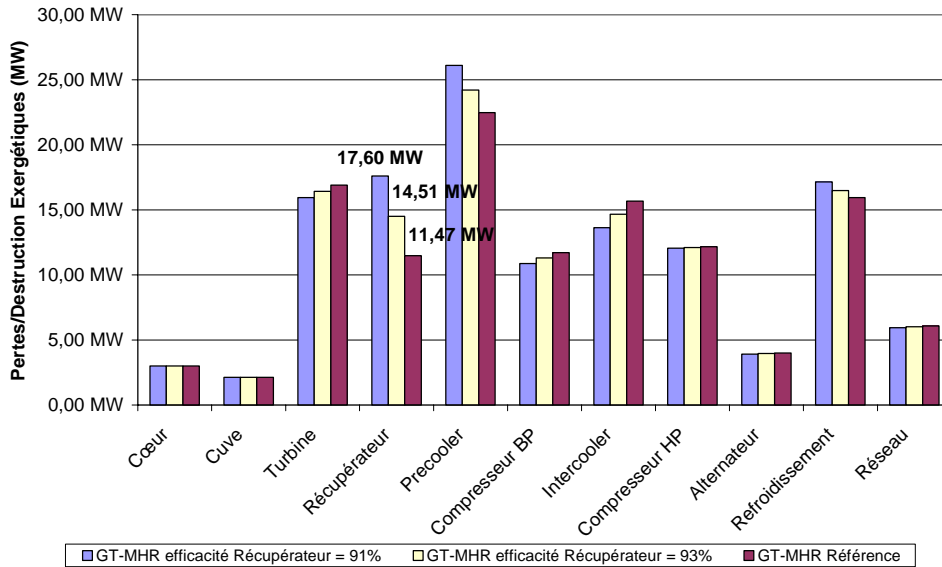


Figure IV-6 - Efficacité du récupérateur sur les pertes exergetiques du cycle GT-MHR

3.1.1.2.4 - Sensibilité à l'efficacité des refroidisseurs (prérefroidisseur et refroidisseur intermédiaire)

On fait varier ici la température d'entrée des compresseurs haute et basse pression : 24°C, 26°C et 28°C. Les efficacités des refroidisseurs sont calculées par CYCLOP, et regroupées dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3 - Efficacité des refroidisseurs en fonction de la température d'entrée compresseur

Cooler\ Tentrée compresseur	24°C	26°C	28°C
Prérefroidisseur (<i>Precooler</i>)	96,9%	95,4%	94%
Refroidisseur intermédiaire (<i>Intercooler</i>)	96,2%	94,5%	92,8%

L'efficacité des refroidisseurs influe directement sur les performances des compresseurs. A efficacité isentropique fixée, l'énergie consommée pour la compression augmente quand la température d'entrée augmente : les deux compresseurs consomment 267,7 MW à 24°C et 271,4 MW à 28°C, soit un gain de 3,7 MW mécanique pour une diminution de 4°C. Le gain de production électrique est de 3,3 MW électrique et les rejets thermiques diminuent de 0,35 MW.

La figure IV-7 indique cependant la faible sensibilité des pertes exergetiques des compresseurs : le bas niveau des températures en entrée (de 24°C à 28°C) et la faible variation considérée pour cette étude ne peut générer des pertes entropiques significatives.

Le coût des refroidisseurs est sensiblement égal, et varie entre 17-18 M€(à 28°C) et 21-23 M€(à 24°C).

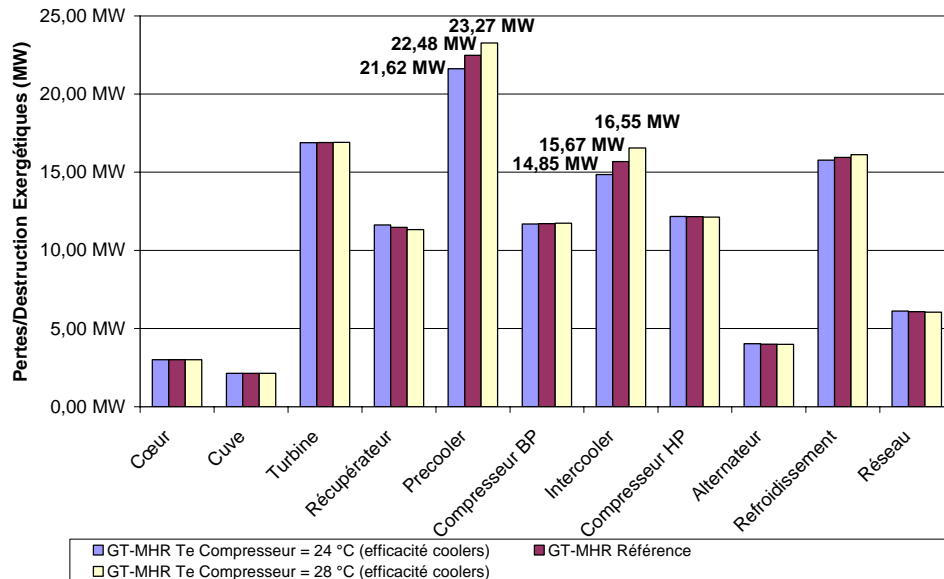


Figure IV-7 - Efficacité des refroidisseurs sur les pertes exergetiques du cycle GT-MHR

4.3.1.1.3 – Conclusions sur l'étude de sensibilité

L'analyse des pertes/destructions exergetiques globales du système [GOM08] en fonction des efficacités des composants, sur le cas simple du cycle direct du GT-MHR, permet de visualiser l'impact de la performance de chaque composant sur la production d'électricité.

Sont à distinguer deux catégories d'appareils :

- les convertisseurs d'énergie (turbine, compresseurs) où l'efficacité isentropique est directement liée à la production ou à la consommation d'énergie mécanique. Plus ces composants seront efficaces, plus la production d'énergie sera grande,
- les échangeurs de chaleur peuvent, dans le cas des refroidisseurs, influencer à la fois sur les conditions de fonctionnement des compresseurs, et sur la production d'énergie. Les refroidisseurs ont une plus faible action sur le rendement et le débit d'eau de refroidissement est fixé. Le récupérateur de chaleur, compte tenu de sa fonction, permet d'augmenter la production en augmentant l'efficacité.

La notion de coût est entièrement liée à l'efficacité des composants, donc à leurs pertes/destructions exergetiques. Pour les échangeurs de chaleurs, la puissance transférée et l'efficacité sont nécessaires au dimensionnement de l'aire d'échange, qui est la principale donnée pour évaluer le coût pour une technologie donnée. Le cas des compresseurs et turbines est différent car seule la puissance mécanique est prise en compte : il est supposé que pour

une technologie donnée, une efficacité maximale correspond à un coût raisonnable. Les fonctions de coût ne considèrent pas l'efficacité isentropique, ce qui n'est pas gênant pour du matériel classique mais le devient en conception innovante. L'idéal serait de pouvoir coupler des moyens de dimensionnement et une fonction de coût adaptée en fonction du choix du concept.

Compte tenu du coût des composants, une optimisation simultanée avec les pertes/destructions exergetiques globales permet d'obtenir un problème mathématique où les critères ont un degré d'interdépendance maximum (par rapport à une optimisation rendement 1^{er} principe / coût) quel que soit le système étudié. Cette interdépendance permet de coupler des données, comme le débit d'eau de refroidissement, celui-ci ayant un impact simultané sur le coût des installations de pompage (débit), sur la conception des refroidisseurs et du récupérateur (coût d'échangeur). L'impact de l'efficacité isentropique des compresseurs et turbines, en terme de coût, est moins évident et doit être exploré. L'impact de l'efficacité des échangeurs de chaleur est plus facilement quantifiable mais est très influencé par les fonctions de coût des échangeurs : le coefficient de transfert global est le plus souvent considéré comme constant, ce qui constitue une approximation grossière. Ce problème a donc un impact sur les résultats de l'optimisation, comme les cas d'application du chapitre VI vont le montrer.

Le calcul des pertes/destructions exergetiques sur chaque composant permet de visualiser son impact sur les pertes totales du système, et a une incidence sur le coût d'investissement.

4.3.1.2 – Cycle direct He/He-N₂/H₂O

Le cycle combiné est un cas plus complexe d'application de la théorie de l'exergie. Cet exemple met en œuvre un cycle de Brayton (comme dans le cas précédent) ainsi qu'un cycle de Rankine avec changement de phase : la génération de vapeur est une forte source de pertes/destructions exergetiques, comme il sera observé par la suite.

Le cycle (figure IV-8) est composé de trois boucles impliquant trois caloporteurs différents :

- la boucle primaire, utilisant de l'hélium, subissant un refroidissement au niveau de l'échangeur intermédiaire de chaleur (IHX : *Intermediate Heat EXchanger*) et une compensation des pertes de charge par insertion d'une soufflante avant retour sur le réacteur,
- la boucle secondaire, utilisant un mélange hélium – azote (respectivement 64% et 36% en masse), est un cycle simple de Brayton : l'IHX est la source chaude et le générateur de vapeur le puits froid. Ce cycle produit de l'électricité,
- la boucle tertiaire, utilisant de l'eau à haute pression, est un cycle de Rankine avec une détente à haute pression et une autre à basse pression.

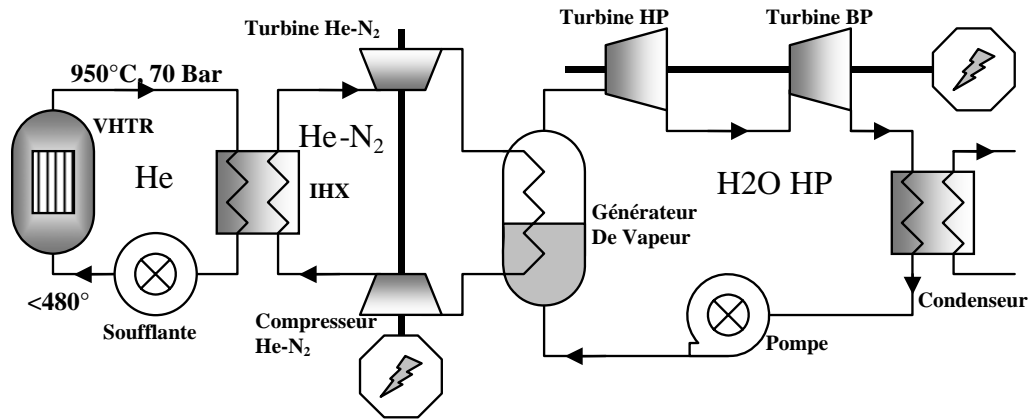


Figure IV-8 - Schéma du cycle combiné He / He-N₂ / H₂O haute pression

L'optimisation du cycle combiné He / He-N₂ / H₂O HP est un exemple plus complexe que le précédent, car il présente un nombre accru de composants et des pertes thermiques sur le générateur de vapeur, en plus de celles prises en compte sur le réacteur.

Les pertes thermiques sont traitées par assimilation à la puissance perdue avec une température égale à la moyenne logarithmique des températures côté chaud. Ces hypothèses impliquent une maximisation artificielle des pertes/destructions exergetiques au niveau du générateur de vapeur (GV).

Des pertes au niveau du condenseur apparaissent aussi car aucune source froide n'a été associée dans le modèle CYCLOP de ce cycle. La température de condensation étant fixée par hypothèse à 32°C, l'association de cette température à la puissance perdue n'aura pas d'impact sur l'optimisation du cycle : la seule variable d'ajustement sera la puissance perdue au condenseur, effet recherché par ailleurs. Par conséquent, l'expression des pertes/destructions exergetiques du Générateur de Vapeur (GV) est la seule susceptible d'influer sur le processus d'optimisation.

Les variables d'optimisation retenues pour ce cycle sont les suivantes :

- la température de sortie de la turbine à gaz (He-N₂),
- la température de sortie gaz (côté He-N₂ secondaire) du Générateur de Vapeur (GV),
- le rapport de détente de la turbine vapeur haute pression.

Les contraintes associées sont :

- une fraction massique vapeur en sortie de la turbine vapeur supérieure à 85 % pour ne pas dégrader le fonctionnement de cette turbine par une vapeur trop humide en sortie,
- la température de pincement moyen logarithmique de l'échangeur de chaleur intermédiaire (IHX) supérieure ou égale à 30°C,
- la température de pincement minimum du générateur de vapeur (GV) à 10°C.

L'étape suivante consiste à localiser les pertes/destructions exergétiques sur le système.

L'application de la méthodologie d'analyse des cycles (§4.2.2) permet d'identifier :

- les flux d'alimentation et de production d'énergie : 600 MW_{th} issu du VHTR, production électrique sur la turbomachine de la boucle secondaire (He-N₂) et de la boucle vapeur haute pression,
- les flux non exploités : chaleur latente au niveau du condenseur (boucle vapeur).

Aucune correction manuelle n'est à effectuer sur la valeur des pertes/destructions exergétiques calculée automatiquement. Il faut noter la modélisation particulière du condenseur dans cet exemple : seul le demi échangeur chaud (côté condensation) est représenté. La chaleur latente transmise « dans le vide » est considérée à juste titre par CYCLOP comme perdue.

L'expression du critère d'optimisation final est simple :

$$\dot{E}x_{Perdue}^{Combiné} = \underbrace{\dot{E}x_{Perdue}^{Calcul Auto}}_{\text{Calcul CYCLOP}} \quad (IV-11)$$

Le cycle électrogène optimisé permet de produire 288,8 MW pour une perte/destruction totale d'exergie de 124,4 MW, ce qui correspond à un rendement exergétique de 69,9%. La figure IV-9 suivant présente la décomposition des pertes/destructions exergétiques des composants du cycle. L'ensemble des résultats de l'optimisation est disponible dans la note technique [GOM08]. Le tableau IV-4 rassemble les caractéristiques de fonctionnement des composants à l'optimum de fonctionnement. Ces valeurs sont des ordres de grandeur de fonctionnement faisables technologiquement.

Les variables d'optimisation ont les valeurs suivantes à l'optimum :

- température de sortie de la turbine à gaz (He-N₂) : 590,9°C,
- température de sortie gaz (côté He-N₂ secondaire) du Générateur de Vapeur (GV) : 164,8°C,
- le rapport de détente de la turbine vapeur haute pression est de 36,7.

Le générateur de vapeur, avec une perte/destruction de 38,0 MW d'exergie, représente à lui seul 30,5 % des pertes/destructions totales du cycle.

Cette valeur est due à l'effet combiné des phénomènes suivants :

- un pincement de température de 30°C,
- des pertes de charge de 20 bar côté vaporisation et de 0,4 bar côté gaz (He-N₂),
- des pertes thermiques de 1,0 MW (exergétiques).

Tableau IV-4 – Caractéristiques des composants pour des pertes/destructions minimales d'exergie

Composant	Puissance (MW)	Efficacité (%) /Pincement (°C)	Pertes de charge (bar) /rapport de pression	Température Maximale (°C)	Pression Maximale (Bar)
IHX (circuit He)	604	94,6% / 30°C	0,4 bar (chaud) / 0,4 bar (froid)	950	70
Soufflante (circuit He)	7,6	88%	x 1,02	434	71
Turbine (circuit He-N ₂)	381,3	93%	x 2,89	920	64,6
Compresseur (circuit He-N ₂)	252,4	88%	x 2,96	392	65
Générateur de Vapeur	474	10°C	0,4 bar (chaud) / 20 bar (froid)	590	150
Turbine HP (circuit eau)	108,7	86,5%	x 37,00	561	130
Turbine BP (circuit eau)	71	86,5%	x 73,77	139	3,5
Condenseur (circuit eau)	296	- / -	0 bar (chaud)	32	0,05
Pompe (circuit eau)	2,44	88%	x 3149,97	32,85	150
Alternateur	298,6	98,7%			
Transmission au réseau	288,8	98%			
Debit boucle He (kg/s)	222,94				
Debit boucle He-N ₂ (kg/s)	580,81				
Debit boucle H ₂ O haute pression (kg/s)	141,44				

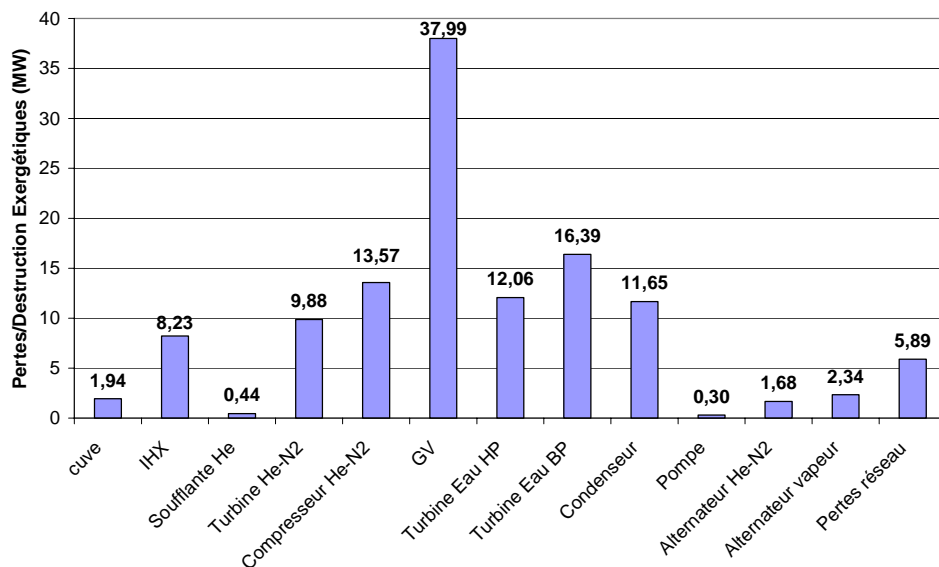


Figure IV-9 – Pertes/destructions exergétiques sur le cycle combiné He / He-N₂ / H₂O haute pression

Cette étude illustre qu'un effort dans l'amélioration des performances du générateur de vapeur, et de sa description est donc nécessaire pour augmenter la production électrique. L'effort dans la description de ce composant, et les autres à un degré moindre, sera par ailleurs nécessaire pour rendre fiables les conclusions et orientations pour la conception de ce cycle. La turbomachine du secondaire de la boucle He-N₂ représente 18,8 % des pertes/destructions et les turbines vapeur 22,9 %, soit un total de 51,9 MW (exergétique) pour la production d'énergie mécanique (machines tournantes uniquement). Rappelons que ces pertes/destructions étaient de 40,7 MW (exergie) pour le cycle direct GT-MHR.

L'exergie perdue au condenseur est plus faible, avec 11,6 MW (au lieu de 38,1 MW pour le cycle GT-MHR), mais le demi-échangeur côté utilité froide n'a pas été pris en compte.

La présence de trois boucles rend complexe l'analyse d'impact de l'amélioration des performances des appareils, mais il est certain qu'une diminution des pertes/destructions du générateur de vapeur va permettre d'augmenter la production. Le cycle vapeur étant limité, en conception, par la pression maximale (150 bar) et par la température du condenseur, le champ d'action se portera sur la boucle secondaire et sur la diminution du pincement de température.

4.3.2 – Production d'énergie : électricité – chaleur - hydrogène

Abordons maintenant la problématique de la production couplée électricité-chaleur-hydrogène. L'objectif est d'étudier les performances des systèmes, à l'aide de l'approche exergétique, afin de pouvoir les comparer sur une même base. Les conclusions de cette étude permettront de déterminer si la production d'hydrogène peut rester une variable d'optimisation, ou si elle doit devenir un paramètre d'étude.

4.3.2.1 – Comparaison des boucles de distribution de chaleur, pour le cycle Iode-Soufre par l'approche exergétique

Deux principales catégories de boucles de distribution de chaleur ont été envisagées pour satisfaire la demande thermique du cycle Iode – Soufre :

- une simple boucle d'échangeurs en série : solution proposée par le Département des Technologies Nucléaires (DTN) [LEY05]. L'hélium du circuit secondaire sert directement de caloporteur pour les échangeurs du cycle Iode-Soufre,
- un réseau d'échangeurs regroupés par niveau de température : c'est la solution proposée par le Département des Études des Réacteurs (DER) [AUJ06]. A l'heure actuelle, seule cette catégorie de boucle fait l'objet de travaux de recherche au sein du DER [AUJ06]. La principale différence par rapport au concept du DTN [LEY05] est que seule une partie de l'hélium secondaire ne circule que dans les réacteurs chimiques car la température y est la plus élevée (décomposition du SO₃). Les demandes au niveau des moyennes et hautes températures sont satisfaites par un circuit tertiaire. Plusieurs voies ont été étudiées en faisant varier la pression de l'hélium secondaire.

Il est absolument nécessaire d'évaluer l'efficacité énergétique des boucles de distribution de chaleur. Le premier principe est dans ce cas inutilisable puisque tous les flux de chaleur sont quantifiés, y compris les pertes thermiques : les conditions de fonctionnement sont

parfaitement connues. Le calcul des rendements exergetiques des boucles permet de discriminer les différentes options (ratio entre l'exergie sortante, chaleur distribuée à un niveau de température donné, et l'exergie entrante, chaleur primaire).

Quatre voies de boucles ont été évaluées par leur rendement exergetique (voir tableau IV-3). La boucle DER à 47 bar, avec un rendement exergetique de 97%, est la solution retenue à l'heure actuelle.

Tableau IV-3 - comparaisons des rendements exergetiques des boucles de distribution de chaleur

Boucles de Distribution de Chaleur	Rendement exergetique (%)	Ecart % (base DTN)
Boucle DER 47 bar + refroidisseur intermédiaire en série	91,07%	-1,49%
Boucle DTN 70 bar	92,55%	0,00%
Boucle DER 27 bar	93,22%	0,67%
Boucle DER 47 bar	96,99%	4,44%

4.3.2.2 – Cogénération électricité – chaleur

Le cycle électrogène direct de type GT-MHR a été couplé, en parallèle, avec une boucle de distribution de chaleur adaptée (en puissance et température) aux demandes du cycle Iode-Soufre (proposition DTN [LEY05], figure IV-5). La demande électrique du cycle Iode-Soufre est proportionnelle à la puissance thermique délivrée. Le système est, de facto, autonome en terme d'alimentation électrique car la demande électrique du cycle Iode - Soufre est modélisée sous CYCLOP comme un puits d'énergie.

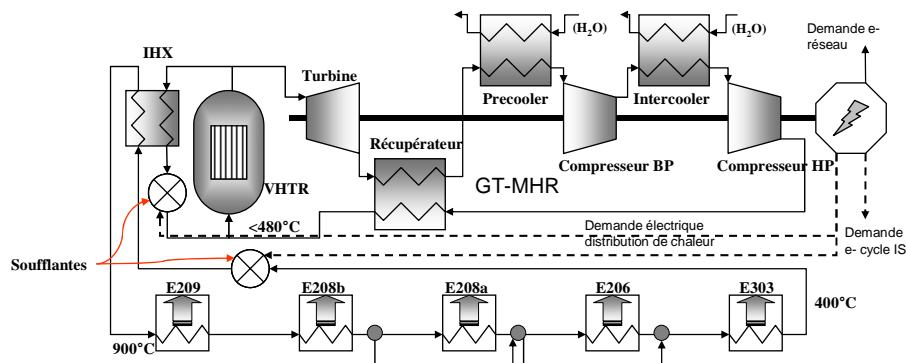


Figure IV-5 - Schéma du couplage du cycle GT-MHR avec une boucle de distribution de chaleur et prise en compte de la demande électrique interne.

Le problème met en jeu deux formes d'énergie, chaleur et électricité, et vise à produire un maximum de chaleur pour une production d'hydrogène prioritaire. Les pertes/destructions exergetiques ne seront considérées que sur le cycle électrogène et sur la boucle de distribution de chaleur : les pertes/destructions sur le cycle Iode – Soufre ne sont pas considérées. Compte tenu du critère d'optimisation, la production électrique excédentaire sera elle-même maximisée. Il s'agit donc d'un simple problème de production d'utilité chaleur et électricité.

Les variables d'optimisation de ce problème sont :

- le rapport de détente de la turbine,
- le rapport de compression basse pression,
- le nombre d'usines de production d'hydrogène (100 mol/s de H₂).

L'analyse des pertes/destructions est ici plus complexe que les cas des cycles électrogènes précédents.

L'application de la méthode d'analyse des pertes/destructions :

- les flux d'alimentation et de production d'énergie : 600 MW_{th} issu du VHTR, la production électrique de la boucle primaire, et la production de chaleur (5 niveaux de puissance et de température),
- les flux non exploités par le système : l'eau de refroidissement des refroidisseurs.

Il y a deux exceptions à considérer pour la correction du calcul automatique des pertes/destructions exergetiques :

- la consommation d'électricité est modélisée sous CYCLOP par un objet « Consommateur » (puits d'énergie). Cet objet est considéré par défaut comme une perte/destruction d'exergie : il faut donc soustraire cette consommation des pertes/destructions calculées par CYCLOP,
- au niveau des échangeurs de la boucle secondaire : la puissance exergetique émise par les demi-échangeurs est considérée comme étant une perte/destruction d'exergie.

L'expression du critère final est donc :

$$\dot{E} x_{Détruit/Perdue}^{GT-MHR} = \left[\begin{array}{l} \underbrace{\dot{E} x_{Détruit/Perdue}^{Calcul\ Auto}}_{\text{Calcul CYCLOP}} + \underbrace{\Delta \dot{E} x_{H_2O}^{Coolers}}_{\text{Calcul Manuel}} \\ - \underbrace{\sum_{i=1}^5 \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i}_{\text{Puissance thermique Produite}} - \underbrace{W_{Elec}^{Conso IS}}_{\text{Demande électrique cycle I-S}} \end{array} \right] \quad (IV-12)$$

L'optimisation de la production de chaleur et d'électricité permet d'alimenter 7 usines de production de H₂ (418,7 MW thermique¹ et 70,2 MW électrique) et présente une production d'électricité excédentaire de 10,9 MW. Les pertes/destructions totales sont de 54,7 MW (exergetiques). Les résultats des calculs sont disponible dans la note technique [GOM08].

¹ Puissance au sens du 1^{er} principe

Les variables d’optimisation ont pour valeur :

- le rapport de détente de la turbine : 3,315,
- le rapport de compression basse pression : 1,870,
- le nombre d’usines de production d’hydrogène (100 mol/s de H₂/usine) : 7.

La figure IV-16 permet de distinguer nettement le cycle électrogène (à gauche de la colonne des pertes/destructions d’exergie de l’échangeur intermédiaire IHX (Intermediate Heat EXchanger) avec une répartition relative des pertes/destructions identiques au cycle du GT-MHR seul (voir figure IV-4).

Les pertes/destructions exergétiques sur le cycle électrogène sont de 34,6 MW d’exergie. Les pertes/destructions sur la boucle de distribution de chaleur (à droite de la colonne des pertes/destructions d’exergie de l’IHX de la figure IV-6) ne représentent que 11,6 MW d’exergie, principalement dues aux pertes de charge. L’IHX présente des pertes importantes (8,1 MW d’exergie soit 14,8 % des pertes totales), dues principalement à la température de retour (400°C) de l’hélium de la boucle de distribution de chaleur, avec un pincement de 50°C.

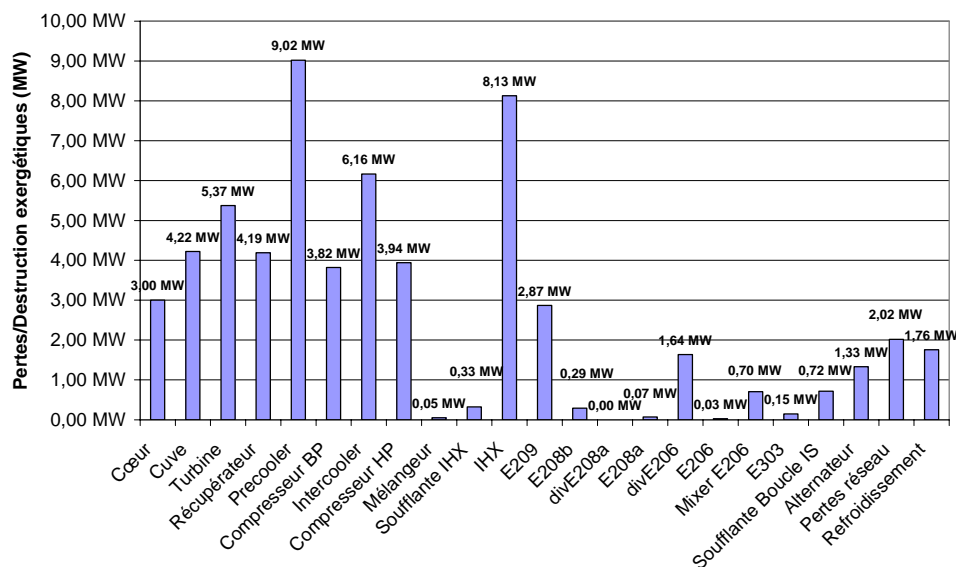


Figure IV-6 – Perte/destruction exergétiques sur le système de cogénération électricité chaleur

On remarquera qu’aucune contrainte sur le ratio de production électricité/chaleur n’a été imposée. Le système tend vers la production de chaleur de façon logique car les pertes/destructions exergétiques du cycle électrogène sont 3 fois plus importantes que les pertes/destructions sur la boucle de distribution de chaleur : la production d’électricité excédentaire n’est due qu’au manque de puissance thermique nécessaire pour alimenter d’avantage d’usines.

Si l’on ne tient pas compte des pertes/destructions d’exergie sur le cycle Iode – Soufre, la minimisation des pertes/destructions exergétiques induit favorablement une production de

chaleur au détriment de la production électrique (dans la limite d'une alimentation électrique autonome) : d'où le maximum de 7 usines pour une production totale de 700 mol/s. Ce comportement de choix de la production thermique est logique car la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique est bien plus coûteuse qu'une simple distribution de chaleur.

4.3.2.3 – Cogénération électricité – hydrogène produit par le cycle Iode-Soufre

Le problème d'optimisation traité ici est complémentaire du précédent en ajoutant les pertes/destructions exergétiques des usines Iode-Soufre à celles du cycle électrogène et la boucle de distribution de chaleur : les variables d'optimisation sont identiques au cas précédent (§3.2.2). La perte/destruction d'exergie sur le cycle Iode – Soufre estimée à 26,2 MW par usine produisant 100 mol/s d'hydrogène (voir chapitre III §3.4). Les pertes/destructions d'exergie sur l'ensemble du système de cogénération sont alors minimisées.

Avant d'effectuer les calculs, une réflexion sur le comportement du système doit être conduite en observant les pertes/destructions relatives. Le rendement exergétique du cycle électrogène est de 71% (voir §3.1.1.1) alors que le rendement du cycle I-S n'est que de 47,3% : la minimisation des pertes/destructions exergétiques va inévitablement favoriser la production électrique au détriment de la production d'hydrogène.

L'optimisation du critère sur ce système, avec CYCLOP, confirme le raisonnement, en ramenant le système à une production exclusive d'électricité (pas de courant d'hélium dans la boucle de distribution de chaleur).

Les résultats de l'optimisation sont disponibles dans la note technique [GOM08]. Le tableau descriptif des pertes/destructions n'est pas fourni (identique aux pertes/destructions du cycle du GT-MHR seul).

4.3.3 – Conclusions sur l'application du critère

Sur tous les exemples précédents, on a cherché à minimiser les pertes/destructions d'exergie sur l'ensemble du système. Aux pertes/destructions sur les composants sont ajoutées les pertes/destructions d'exergie sur les courants de matière (eau de refroidissement par exemple), rejetés par le système et non exploités.

Ce critère a été appliqué avec succès aux exemples de cycles électrogènes, en permettant d'obtenir une production électrique maximale en minimisant les pertes/destructions exergétiques. La maximisation du rendement (1^{er} principe) est théoriquement équivalente au critère proposé ici, dès lors que les températures des sources chaudes ne sont pas des variables d'optimisation.

La deuxième partie concerne la cogénération d'électricité et d'hydrogène. Cet objectif a été successivement approché à l'aide de deux exemples. Le premier traite d'une cogénération d'électricité et de chaleur à destination du cycle Iode – Soufre (I-S). Les demandes thermiques et électriques sont connues pour une usine : le nombre d'usines est une des variables d'optimisation. L'analyse des pertes/destructions exergétiques sur les composants a permis de déterminer que les pertes/destructions sur la boucle de distribution de chaleur étaient

nettement plus faibles que sur le cycle électrogène : le minimum des pertes/destructions exergétiques correspond à une alimentation de 7 usines I-S et une production d'électricité excédentaire de 11 MW (correspondant à la conversion de la chaleur non distribuée pour la production d'hydrogène). Le système étudié tend donc logiquement vers la distribution de chaleur au détriment de la production d'électricité.

L'étude de la cogénération électricité-hydrogène se fait par simple extension du cas précédent en ajoutant les pertes/destructions exergétiques sur le cycle I-S (en tenant compte du nombre d'usines) à celles de la production d'électricité et de distribution de chaleur. Le calcul des rendements exergétiques du cycle électrogène et du cycle I-S (respectivement 71% et 47,3%) ont montré un écart important de leur performance de conversion d'énergie, en faveur du cycle électrogène. L'optimisation des pertes/destructions sur l'ensemble du système de cogénération a donc induit une production exclusive d'électricité, la production d'hydrogène étant moins intéressante.

Les exemples de cogénération montrent la simplicité et la rigueur d'application de la théorie de l'exergie et la robustesse du critère de minimisation des pertes/destructions, ne subissant aucune modification dans son principe élémentaire : minimiser la somme des pertes/destructions d'exergie sur les composants et les fluides non exploités énergétiquement (ex : refroidissement par eau). La capacité à choisir les systèmes les plus efficaces (cas de la cogénération électricité - chaleur et électricité - hydrogène) est une propriété, théoriquement prévisible, pouvant avoir un impact dans la conception des systèmes de distribution de chaleur par exemple (boucle simple ou boucle par niveau de température). Le caractère additif de l'expression du critère (minimisation des pertes/destruction d'exergie sur un système) est également tout à fait adapté à un calcul automatique, quel que soit le système modélisé.

4.4 – Conclusion générale

Les problèmes de cogénération d'hydrogène et d'électricité doivent être traités à l'aide d'un critère énergétique pour analyser les performances de chacun des composants du système de cogénération qui peut être optimisé. Il faudra également prendre en compte un critère économique représentant le coût total sur la durée de vie des systèmes étudiés.

La théorie de l'exergie, présentée dans le chapitre III, étudie les phénomènes de perte d'énergie « utile » et convertible pour le système. Le concept d'énergie potentiellement utilisable, appelée exergie, repose sur le principe suivant : l'énergie totale fournie à un système ne peut être récupérée intégralement car les systèmes de conversion d'énergie ne sont pas idéaux. Ces irréversibilités ont trois origines principales : les transferts de chaleur, les pertes de charges et les mélanges de courants de matière (conditions T, P différentes). Les réactions chimiques produisent également des irréversibilités dues à la différence d'entropie entre les produits et les réactifs : ce dernier type de perte n'est pas développé.

Le critère d'optimisation retenu est donc la minimisation des irréversibilités, et par extension, l'énergie directement perdue par le système vers le milieu extérieur, via le refroidissement ou les pertes de chaleur : on regroupera toutes ces déperditions sous le nom de pertes/destructions d'exergie du système. L'expression de ce critère global est également

compatible à l'échelle du composant : cet aspect modulaire des bilans exergétiques permet leur usage par CYCLOP pour un calcul automatique du critère.

On peut sérier les systèmes de cogénération électricité - hydrogène en trois fonctions élémentaires. La première fonction est la production d'électricité. Les deux exemples du §4.3 présentent des cycles électrogènes où les efficacités des composants principaux (compresseurs, turbines et échangeurs) sont figées. Dans ce cas seulement, une équivalence théorique existe entre le concept d'exergie et de rendement (1^{er} principe), pour maximiser la production d'électricité. En fixant ces efficacités, l'action du critère exergétique est restreinte. En conception innovante, l'efficacité des composants doit pouvoir être étudiée : dans ce cas de figure, la théorie de l'exergie est la seule acceptable thermodynamiquement pour les cas de cogénération.

La deuxième fonction est la distribution de chaleur entre le réacteur et les demandes pour la production d'hydrogène. Une seule configuration en simple boucle a pu être modélisée, pour répondre aux besoins du cycle Iode – Soufre. L'étude de systèmes différents, utilisant notamment des boucles par niveau de température, a été menée grâce à l'évaluation des pertes/destructions exergétiques de ces systèmes : le rendement exergétique permet de discriminer efficacement les boucles de distribution de chaleur, ce qui est impossible à partir du 1^{er} principe seul.

La production d'hydrogène est la troisième fonction du système. Le rendement du cycle Iode –Soufre est fortement lié au pouvoir énergétique de l'hydrogène et à sa définition. La théorie de l'exergie ne distingue pas le pouvoir énergétique supérieur ou inférieur d'un combustible : la quantité d'énergie utile, et donc d'exergie, produite lors d'une combustion est la même quelles que soient les conventions prises (définition du pouvoir calorifique inférieur et supérieur).

Le rendement exergétique du cycle Iode – Soufre, évalué à 47,3% pour une conception déterminée [LEY05], est nettement inférieur aux rendements exergétiques des cycles électrogènes (71% pour le GT-MHR et 69,9% pour le cycle combiné ANTARES).

L'optimisation de la cogénération électricité - hydrogène avec le critère exergétique seul ne peut donc qu'aboutir au choix de la production d'électricité. D'un point de vue thermodynamique, la notion de maximisation de production d'électricité et d'hydrogène n'a pas de sens dans ce cas : il faudra donc travailler sur des scénarii de production d'hydrogène.

Ce dernier résultat n'est pas un constat d'échec sur la pertinence du critère : elle indique au contraire qu'il est capable de réaliser des choix de « bon sens » énergétique. Cette capacité à choisir les systèmes est un atout majeur pour concevoir des structures de systèmes innovants. De plus, le rendement exergétique d'une usine de production d'hydrogène est lié à sa conception : elle est donc susceptible d'évoluer favorablement.

La notion de coût ne doit pas être oubliée : l'efficacité accrue des composants a un coût élevé. L'investissement est certes significatif, mais à l'échelle de vie pour le système, les coûts opératoires prennent une place prépondérante. Si des postes tels que l'entretien sont inaccessibles au critère exergétique retenu (pour l'instant), les demandes en utilités froides (eau de refroidissement) sont considérées comme une perte d'énergie et, par conséquent,

doivent être minimisées. Les fonctions de coût sont représentatives pour les échangeurs (coût fonction de la surface d'échange) mais ne le sont pas pour les turbines et les compresseurs (fonction de la puissance mécanique principalement). L'efficacité isentropique de ces machines n'est pas prise en compte : les fonctions de coût actuelles sont basées sur le principe qu'une turbine commerciale est un compromis entre une efficacité maximale et un coût acceptable : seule la puissance compte dans ce cas. L'impact de l'efficacité isentropique sur la conception, puis sur le coût doit être étudié pour ce type de composant alors quelle est relativement connue pour les échangeurs de chaleur.

Ainsi, le critère de minimisation des pertes/destructions exergétique s'avère simple et robuste d'emploi, et apte à traiter des problèmes où plusieurs formes d'énergie sont produites, grâce à la cohérence de la théorie de l'exergie. Son couplage, avec un critère économique basé sur le coût, pour la durée de vie des installations (investissement actualisé), permettrait de comparer les différentes solutions étudiées sur une base théorique plus solide que celle basée sur des rendements énergétiques seuls.

CHAPITRE V

Analyse technico-économique des systèmes énergétiques

5.1 – Introduction

Une difficulté majeure en technico-économie consiste à réunir un nombre suffisant de données économiques sur un système.

Le chapitre I a permis de définir le système de couplage entre réacteur nucléaire, cycle électrogène (cycle de Brayton) et usines de production d'hydrogène, impliquant des conditions contraignantes de fonctionnement, notamment liées aux hautes températures, des pressions élevées (70 bar) et l'utilisation d'un caloporteur gazeux comme l'hélium, conférant ainsi un caractère innovant à ces systèmes. Ces éléments expliquent un manque de données dans ces conditions extrêmes. L'approche proposée ici se base sur une méthodologie adaptée d'évaluation de coûts des composants principaux, prenant en compte des facteurs correctifs liés à la pression opératoire ou au choix des matériaux, reposant sur des calculs de tenue mécanique aux normes nucléaires.

Ce chapitre est constitué de trois parties principales :

- la première est dédiée à l'examen des données disponibles pour identifier les développements nécessaires et dégager une méthodologie de création de modèles de coût pour les composants innovants, ainsi que les modifications à apporter au modèle de coût global des sites nucléaires (SEMER),
- la deuxième partie traite des fonctions de coût pour les composants des systèmes étudiés. Pour les usines de production d'hydrogène, seul le cycle thermochimique Iode-Soufre est retenu, en raison de l'état d'avancement des études technico-économiques par rapport aux autres systèmes actuellement en cours d'étude,
- puis, la dernière partie traite de l'adaptation du modèle SEMER du GT-MHR, au cas du couplage du VHTR avec une turbomachine pour la production d'électricité. Cet exemple permettra d'aborder l'exemple de la cogénération électricité/hydrogène, en utilisant le même type de turbomachine. La différence essentielle réside dans l'intégration d'un échangeur pour le circuit de distribution de chaleur à destination des usines de production d'hydrogène. Enfin, un dernier exemple traite d'un site de production exclusive d'hydrogène : l'électricité nécessaire au fonctionnement du site est importée du réseau. Les modèles économiques présentés ici sont utilisés lors de l'optimisation technico-économique du chapitre VI.

Note importante : les études technico-économiques qui vont suivre n'ont fait l'objet d'aucune action de validation des coûts des composants, et du calcul de l'investissement global. Cependant la démarche adoptée est identique, dans ces principes, à celle mises en œuvres dans les études économiques qui ont servi de référence à ce mémoire. Il n'est donc, en aucun cas, question de considérer les solutions proposées comme une base décisionnelle pour les systèmes présentés ici, actuellement en cours d'études. Les références technico-économiques utilisées sont cependant les plus avancées dans l'évaluation des projets.

5.2 – Technico-économie des systèmes étudiés

5.2.1 – Données économiques disponibles : état des lieux

5.2.1.1 – Introduction

On peut identifier deux grandes phases dans l'évaluation économique d'un procédé. Tout d'abord, une phase de pré-études, dans laquelle les conditions générales de fonctionnement nominal sont dictées par les cinétiques rationnelles et les procédés de traitement des produits de synthèse (distillation, extraction ...). A cette occasion, un diagramme du procédé est établi et une méthode d'estimation globale mise en œuvre.

Puis, un dimensionnement préliminaire des différents appareils est effectué, tenant compte des objectifs de production : ce dimensionnement est réalisé sur la base du niveau de connaissances actuel du procédé. Il sert de base pour la mise en œuvre de la méthode des facteurs (voir §5.3.1) retenue dans l'étude. Dans cette phase, l'impact des différents postes de dépense d'installation des appareils est considéré d'un point de vue statistique, basé sur l'expérience acquise notamment dans l'industrie pétrolière.

L'objectif de l'étude qui suit est de faire le bilan des données fiables et exploitables pour traiter les cas présentés dans le paragraphe 5.2.1.

Dans un premier temps, il est nécessaire de faire un état des lieux des données économiques disponibles pour la réalisation des fonctions de coût pour des composants clés, i.e., turbines et compresseurs axiaux, échangeurs de chaleur compacts de technologie plaques-ailettes, et enfin coût du combustible nucléaire, qui représente un poste important.

5.2.1.2 – Estimation du coût de production du « Power Conversion System »

L'étude menée par une société [FOU05] permet de disposer d'une estimation avec précision comprise entre 10 et 15% (plus proche de 10% d'après l'auteur). Par son contenu, ce type de précision est caractéristique d'une étude semi-détaillée à détaillée : le coût des composants est fonction de leurs dimensions et de leurs masse avec une précision de $\pm 15\%$.

Avant toute réflexion sur l'établissement de fonctions de coût complexes pour les composants d'une turbomachine, il convient d'en définir les poids relatifs, en termes de coût, et en termes de masse. Le tableau A V-1 (annexes) décompose de façon semi-détaillée les différents postes de dépense, évalués à l'aide d'une étude technico-économique [FOU05] détaillée.

Il est également intéressant d'observer la part du matériau de base dans le coût total, d'autant plus faible que le coût d'usinage-montage est important : c'est le cas notamment pour les échangeurs (3 %), pour les turbines et compresseurs (1,7 %) et le poste support-arbre-paliers (2,7 %). Cette part est plus élevée pour le poste tuyauterie (20 %) et conteneur (36 %).

D'un point de vue strictement économique, l'intérêt de produire des fonctions de coût élaborées (fonction de dimensions géométriques) croît avec l'importance de la part des composants sur le coût total. Bien qu'a priori rien ne doive être négligé, la possibilité de

formuler des fonctions de coût élaborées est strictement dépendante des outils disponibles pour les alimenter. Des ouvrages, tels que celui de Pierre Foussier [FOU06] peuvent donner un éclairage sur la décomposition des coûts de production, c'est-à-dire déterminer la part de l'usinage et de la matière première pour évaluer des composants innovants. Ce point doit donc être examiné au cas par cas dans le paragraphe 3.

5.2.1.3 – Tendances d'évolution des coûts pour un cycle direct couplé à un réacteur à haute température

Les évaluations économiques détaillées sont quasi-inexistantes dans le domaine nucléaire. Ce paragraphe va analyser une publication allemande de 1974 [SCH74] traitant pour chaque composant de l'impact chiffré des conditions de fonctionnement. Cet article ne donne pas de valeurs absolues mais des coefficients de corrections, définis par rapport à une référence précise : ainsi il est possible de pouvoir quantifier les variations du coût en fonction des conditions opératoires.

La température d'entrée de la turbine a un impact direct sur le choix des matériaux des parties mobiles (ailettes surtout) en contact direct avec l'hélium : le coût de la turbine augmente jusqu'à 50 % lorsque le coût du matériau augmente d'un facteur 10.

Pour une température d'entrée de 950°C, constituant le cas de base, les auteurs indiquent que le coût des ailettes est multiplié par 3 pour une température de 1050 °C, et par 10 pour 1150 °C. Les auteurs ne précisent pas la nature des matériaux utilisés, sauf pour le cas de base (950 °C) où l'on propose du Nimonic105 (alliage à base de nickel – cobalt – chrome renforcé par ajout de molybdène – aluminium – titane).

La pression a également un impact sur l'investissement. Une turbomachine fonctionnant à 120 bar est 30 % moins chère qu'une machine à 60 bar (pour une puissance de 1000 MW) ; cette affirmation est discutable tant il paraît évident qu'une augmentation de la pression va induire une augmentation d'épaisseur des viroles. L'augmentation de la pression a pour conséquence d'améliorer l'efficacité des turbines : à puissance constante, l'augmentation de la pression permet de diminuer la taille de l'appareil, donc son coût car les parties mobiles sont plus chères et toute réduction de taille sur ce poste est significative. Le tableau V-1 donne les valeurs du ratio de coût pour la turbomachine.

Tableau V-1 - Facteurs de proportionnalité du coût de la turbomachine

Paramètre	Domaine d'application	Facteur de proportionnalité	Référence
Température d'entrée de la turbine (°C)	850 à 1150	$3,34 + \left(\frac{T_{in}}{1000}\right)^{7,8}$	$T_{in} = 850^{\circ}C$
Puissance de la turbine (MW)	500 à 2000	$\left(W_T\right)^{\frac{285}{1,7} + 0,6} P_{in}^{-0,6}$	$T_{in} = 950^{\circ}C$
Pression d'entrée (bar)	50 à 120	$P_{in}^{-0,6}$	$T_{in} = 950^{\circ}C$ et $W_T = 1000$ MW

La littérature fournit des exemples de coefficients de correction du coût, pour les turbines et les compresseurs, en fonction de l'efficacité isentropique [ROO03]. La forme générale du coefficient correctif (équation V-1) permet d'augmenter le coût lorsque l'efficacité isentropique augmente. Ce modèle est trop simple pour être pris en compte. Cependant, une étude de sensibilité sera effectuée dans le chapitre VI, afin d'évaluer l'impact de ce coefficient correcteur sur les solutions optimales.

$$\varphi_{IS} = \frac{\alpha}{\beta - \eta_{IS}} \quad (V-1)$$

avec :

φ_{IS} : facteur de correction isentropique

α, β : constantes fournies

η_{IS} : rendement isentropique

Dans l'étude examinée, aucune précision sur les matériaux mis en œuvre n'est donnée, mis à part la turbine, ce qui limite l'utilisation de ces relations. De plus, l'ancienneté de ces estimations (1974) fait qu'il est nécessaire d'actualiser ces données. Cette étude est malgré tout la seule à présenter de telles informations sur les ordres de grandeurs des variations de coût en fonction des conditions opératoires essentielles des cycles directs (température et pression d'entrée de la turbomachine) ayant une influence prépondérante sur la conception des composants, et donc sur les coûts. Dans le cas particulier de la turbomachine, il est envisageable d'utiliser ces modificateurs afin de corriger la corrélation établie pour la turbomachine à partir de l'étude [FOU05].

5.2.1.4 – Estimation des coûts pour les échangeurs plaques-ailettes en aluminium

L'estimation du coût des échangeurs plaques-ailettes est aussi d'une grande difficulté du fait de l'inexistence de méthodologie ni de références dans ce domaine. Quelques ordres de grandeurs sont cependant disponibles, principalement pour les échangeurs en aluminium, mais l'utilisation de matériaux à haute température (AISI 316, Incoloy 800) ne fait l'objet d'aucune étude.

Il est donc nécessaire de mener une étude pour développer une fonction de coût réaliste. Dans un premier temps, il est nécessaire d'étudier le processus de fabrication de ce type d'échangeur, de rechercher les coûts de chaque étape de fabrication, puis de déterminer une formulation générale de la fonction de coût, qui sera, de façon évidente, un compromis entre informations disponibles et extrapolation.

Une étude du Bryan Research & Engineering [LUN06] donne quelques indications sur le coût de l'opération de brasage. Les caractéristiques de 4 échangeurs en aluminium sont fournies, en précisant leurs caractéristiques géométriques et leur prix. Ces données sont traitées dans [GOM08] et permettent de réaliser des fonctions de coût dépendantes de la surface d'échange et de la pression de service.

5.2.1.5 – Coût du combustible

Le calcul du coût du combustible a été calqué sur celui étudié dans le cadre d'une évaluation du projet PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) [BAR03] faite en 2003. Le combustible à boulet du PBMR a des caractéristiques assez similaires à celui d'un cœur à prisme en supposant que le coût de fabrication de la matrice boulet est similaire à celui des compacts et blocs. La plage de coûts publiée en 2003 se situe entre 0,43 et 0,56 c\$/kWh électrique. On retiendra la valeur haute estimée à $0,56/1,25 = 0,45$ c€/kWh électrique.

L'aval du cycle est un point important de l'analyse surtout en ce qui concerne les réacteurs à haute température (HTR), car on s'accorde à terme sur un surcoût probable du stockage et/ou retraitement du combustible ainsi que du graphite. En raison des masses cumulées (jusqu'à 6000 tonnes sur sa durée de vie), celui-ci ne pourra certainement pas être stockable en surface et nécessitera un retraitement. La technologie et les procédés de retraitement n'étant pas encore définis à ce jour, aucune estimation de ce coût n'est disponible. Les coûts de l'aval du cycle estimé pour un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) [BER06] sont utilisés pour la présente estimation. Sur la base d'une actualisation de 8% sur les coûts de retraitement et des déchets à haute activité, on obtient une valeur de 0,204 c€/kWh électrique, ce qui correspond à une estimation optimiste.

5.2.2 – Décomposition des coûts d'une centrale nucléaire avec le code SEMER

5.2.2.1 – Présentation générale de SEMER

L'évaluation des coûts de production de l'électricité et de l'hydrogène doit être la plus adaptée possible au contexte nucléaire. SEMER (Système d'Évaluation et de Modélisation Économique des Réacteurs) [NIS03] est un code d'évaluation technico-économique développé au CEA pour les centrales nucléaires produisant de l'électricité. Son développement a commencé il y a une dizaine d'années, d'abord au SIS (Service d'Innovation de Systèmes), et continue aujourd'hui au SESI (Service d'Étude des Systèmes Innovants).

Les objectifs de SEMER sont :

- évaluer l'intérêt économique des divers concepts de réacteurs du futur, par comparaison avec les systèmes existants,
- estimer l'impact économique des innovations proposées pour l'amélioration de la sûreté, et pour la maîtrise du cycle du combustible,
- aider à la conception des réacteurs innovants en soulignant les voies de recherche et de développement économiquement les plus prometteuses.

Les modèles de calcul économique SEMER ont été développés suivant deux axes complémentaires :

- les modèles « globaux » qui fournissent et calculent le coût macroscopique du kWh pour plusieurs types de centrales classiques et nucléaires. L'architecture de ces modèles est prédéfinie, et correspond à une filière ou à un type de réacteur précis. Seuls certains paramètres globaux relatifs à la construction (durée, taux d'intérêt, etc ...) ou à la puissance sont modifiables. Les résultats sont validés dans une certaine plage autour de la valeur de référence. Le découpage de ces postes est calqué sur la nomenclature de référence AIEA (Agence Internationale pour l'Energie Atomique),
- les modèles « détaillés » qui calculent le coût des principaux composants ou circuits d'une centrale de référence. A ce jour, cette approche est validée sur le REP de EDF.

La bibliothèque SEMER est donc constituée d'un ensemble de modèles de centrales nucléaires que l'on peut utiliser en fonction des besoins des études ou enrichir par de nouveaux modèles.

Les modèles détaillés concernent des composants comme la cuve, les générateurs de vapeur (tubes en U ou tubes droits), le pressuriseur, les pompes primaires, le pont roulant, la tour de refroidissement classique...

Pour traiter les exemples de systèmes proposés dans ce travail, il sera nécessaire de modifier le modèle global à l'aide de nouvelles fonctions de coût, donnant lieu à des études technico-économiques pour évaluer les composants innovants (voir §5.3.1). Elles viendront enrichir la base de données déjà existante, après une phase préalable de validation.

5.2.2.2 – Présentation d'un modèle global SEMER

Les grandeurs caractéristiques du réacteur nécessaires en entrée des modèles globaux sont : la puissance du réacteur, le nombre de tranches par site, la cadence de construction (nombre de réacteurs construit par an), le nombre total de réacteurs construits, la durée de construction, la durée d'appel (nombre d'heures de fonctionnement par an), la durée de vie du réacteur, le rendement de la production électrique.

D'autres informations concernent les aspects financiers du projet comme les taux d'intérêt ou d'actualisation. Les différents coûts de la centrale à évaluer sont répertoriés et organisés suivant le découpage défini et proposé par l'AIEA. Ainsi l'évaluation faite par le modèle global de SEMER consiste en un calcul économique réalisé indépendamment pour chaque poste identifié (voir figure V-1).

Les coûts directs concernent essentiellement les coûts relatifs à la construction (génie civil), comme les coûts d'acquisition du site, celui des matériels relatifs aux réacteurs (mécanique nucléaire), des composants de conversion d'énergie (mécanique classique), du contrôle commande et des systèmes auxiliaires. Les coûts indirects concernent les aspects

touchant à l'ingénierie, aux études et aux infrastructures nécessaires à la construction du réacteur. Les coûts de construction sont alors la somme des coûts directs et indirects ainsi qu'une provision pour le démantèlement futur du réacteur. Enfin les coûts d'investissement prennent en compte les coûts de construction et les intérêts intercalaires. Ensuite SEMER calcule un coût de production du kWh à partir de ces résultats.

Ce coût du kWh se décompose en trois parties (figure V-1) :

- L'investissement, pour lequel intervient le taux d'actualisation
- L'exploitation et la maintenance du réacteur
- Le cycle du combustible : cette fonction de coût est validée sur les données du réacteur REP, en considérant une gestion dite standard du combustible.

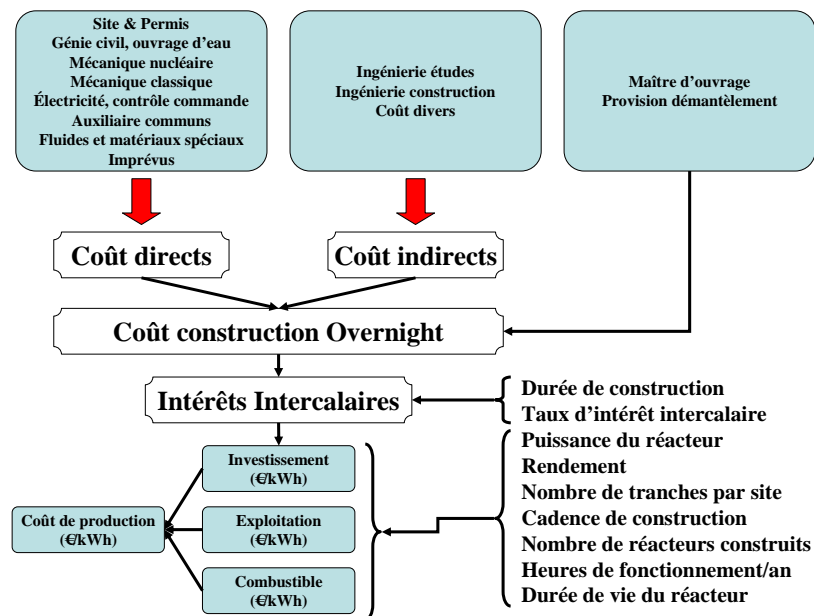


Figure V-1 – Synoptique de décomposition des coûts et de calcul de coût de production électrique

5.2.3 – Développements nécessaires

Des contacts avec l'auteur de l'étude sur la turbomachine [FOU05] ont permis d'orienter le mode d'expression des fonctions de coût. Deux possibilités se présentaient : soit reprendre l'analyse détaillée du coût et créer une loi d'évaluation couplée avec un module de dimensionnement de la turbine permettant de définir l'ensemble des paramètres évalués par [FOU05] (coût des ailettes de turbines, coût des soudures...) soit créer une loi de type $a \times b^C$ (b facteur de taille) permettant ainsi d'extrapoler le coût du PCS pour des puissances inférieures.

En cogénération, la puissance du PCS (286 MW en configuration production d'électricité) va donc être réduite, aussi, l'estimation réalisée par [FOU05] constitue donc une

enveloppe. Afin d'établir une loi la plus flexible possible, le coût des composants sera considérée de façon indépendante. Dans le cas des compresseurs et de la turbine, une loi de puissance est utilisée : les domaines de validité des fonctions de coût sont restreintes et inadaptées au format actuel du PCS. Les échangeurs seront évalués, en fonction de l'aire d'échange, en tenant compte de la technologie plaques-ailettes des échangeurs : une technique d'estimation des coûts a été spécifiquement conçue, et développée dans la note [GOM08].

Les coûts des autres postes seront également traités par des lois puissance.

L'analyse du rapport d'estimation du PCS [FOU05] (voir tableau annexes A V-1) permet d'établir une hiérarchie dans la pertinence de l'établissement de fonctions de coût :

- les échangeurs (33,1 % du coût) : ces composants peuvent, à l'aide des outils de prédimensionnement actuellement disponibles (avec éventuellement quelques modifications), évaluer la géométrie globale des modules. Cette géométrie servira comme référence pour une fonction de coût utilisant l'aire d'échange,
- la turbomachine (32,6 %) : les turbines et compresseurs ne pourront être dimensionnés pour l'instant. Une simple fonction de coût, utilisant la puissance, et corrigées par la pression (voir tableau V-2) sera développée,
- les supports, arbres et paliers (14,4 % du coût) : aucun outil ne permet d'en établir la géométrie. Une fonction utilisant la puissance de la turbomachine sera appliquée,
- le conteneur (7,6 % du coût) : aucun outil ne permet d'en établir une géométrie. Une fonction utilisant la puissance de la turbomachine sera utilisée,
- la tuyauterie de circulation de l'hélium (2,1 % du coût) : une fonction en puissance sera utilisée,
- l'assemblage final (10,2 %) : un coût forfaitaire sera considéré.

L'évaluation de l'IHX sera différente, car aucune estimation de coût n'a été effectuée. Cet échangeur est constitué d'échangeurs plaques ailettes : cette technologie est identique à celle des échangeurs de la turbomachine. Les matériaux et les géométries sont différents : la méthode d'estimation des coûts des échangeurs plaques-ailettes devra prendre en compte la nature des matériaux (Inconel) et l'impact de ceux-ci sur les coûts de fabrication, qui représentent jusqu'à 90% du coût de ce type d'échangeur en aluminium.

Sur l'IHX, les développements nécessaires sont les suivants :

- évaluer le coût des modules d'échange pour des conditions de température élevées et créer une fonction de coût,
- déterminer une fonction pour le circulateur d'hélium et son moteur électrique : l'étude s'appuiera sur l'estimation des compresseurs du PCS,
- déterminer une fonction de coût pour le conteneur de l'IHX : on utilisera une fonction identique à celle du PCS,

- le coût de la tuyauterie interne utilisera la fonction utilisée pour le PCS, mais en effectuant une correction pour tenir compte du matériau (Inconel).

Le coût des conduites de transport de l'hélium, du réacteur vers les usines de production de H2 doit également faire l'objet d'une estimation.

5.3 – Évaluation des coûts des composants

5.3.1 – Introduction à la méthodologie

Une des principales difficultés rencontrées lors de cette étude est le manque de fonctions de coût sensibles à un nombre suffisant de paramètres de fonctionnement des systèmes optimisés. Ainsi, le critère économique doit présenter un niveau de connexion suffisant, avec le critère énergétique pour éviter que des biais apparaissent lors de la phase d'optimisation multicritère. Il faut que les fonctions de coût tiennent compte des conditions de fonctionnement élémentaires d'un composant : débits de flux de matière qui le parcourent, niveaux de température, pressions, ... Ces conditions vont permettre d'estimer leur taille, de choisir les matériaux qui les constituent ainsi que leur masse pour satisfaire aux conditions nominales de fonctionnement : un coût peut alors être estimé par un ingénieur spécialiste.

Ces fonctions de coût doivent représenter un niveau de connaissance « ingénierie » suffisamment acceptable, en intégrant un maximum de données issues d'études de prédimensionnement. Ces études aboutissent à des références de taille, qui feront l'objet d'une estimation de coût, puis de l'ajout de coefficients de correction afin de créer une fonction de coût capable de représenter le coût d'un appareil sur une large gamme de conditions de fonctionnement.

En résumé, les étapes de la création d'une fonction de coût innovante sont :

1. Recherche de conditions de fonctionnement de référence « $P^{Réf}$ »,
2. Prédimensionnement (si possible) du composant,
3. Estimation du coût du composant de référence « $Coût_{Réf}$ »,
4. Recherche de facteurs de correction « φ » pour tenir compte des conditions opératoires « P » et permettant d'extrapoler le coût de référence,
5. Mise à jour des fonctions de coût.

On obtient une fonction du type.

$$Coût(P_1, \dots, P_n) = Coût_{Réf} \times \varphi_1(P_1, P_1^{Réf}) \times \dots \times \varphi_n(P_n, P_n^{Réf}) \quad (V-2)$$

L'aboutissement de ces cinq phases permet d'obtenir une fonction de coût utilisant directement les informations fournies par un simulateur, compatibles avec le simulateur CYCLOP. Le dimensionnement de référence (phase 2) doit être une solution réaliste avec, si possible, un compromis technico-économique.

Les fonctions de coût sont toujours en relation avec une date d'estimation, et leur mise à jour est indispensable pour tenir compte de l'évolution du prix des matériaux et des coûts de production. Si les masses et les matériaux d'un composant sont disponibles, on peut toujours déterminer la part du coût des matériaux seuls (équation V-3). L'« autre » partie du coût représente les frais d'usinage, d'ingénierie et les bénéfices : cette part du coût n'est jamais disponible, donc difficilement actualisable.

$$Coût_{Réf}^{année\ m} = Coût_{Réf}^{année\ m}(Matériaux) + Coût_{Réf}^{année\ m}(Usinage) \quad (V-3)$$

$$Coût_{Réf}^{année\ n}(Matériaux) = Coût_{Réf}^{année\ m}(Matériaux) \times \frac{Coût_{Matériaux}^{Année\ n}}{Coût_{Matériaux}^{Année\ m}} \quad (V-4)$$

$$Coût_{Réf}^{année\ n} = Coût_{Réf}^{année\ n}(Matériaux) + Coût_{Réf}^{année\ m}(Usinage) \quad (V-5)$$

Seule la part « matériaux » peut être actualisée à l'aide d'indices de coût : on obtient ainsi le coût de référence actualisé (équation V-5). Cette méthode est systématiquement adoptée pour l'ensemble des composants étudiés. L'intérêt de cette méthode est d'éviter des facteurs de correction directs sur le coût de référence, ce qui impliquerait une correction d'une trop grande ampleur. Les coûts des matériaux peuvent avoir diverses provenances mais une seule règle doit prévaloir : conserver la même base pour l'ensemble d'une étude. Les études présentées dans ce mémoire utilisent les cours affichés annuellement dans la revue « L'Usine Nouvelle » : les tables donnent les écarts de prix en €/Tonne sur une base de 2001. Dans le cas des métaux, matériaux le plus utilisé dans les composants étudiés, on trouve trois catégories de mise en forme des métaux : les ½ produits, barres et fil machine. Les estimations qui seront présentées par la suite utilisent les cours pour les ½ produits : un ½ produit est un produit non finalisé et destiné à subir d'autres transformations. Lorsqu'il est nécessaire d'établir la part de la matière première dans le coût d'un composant, il faut avoir à l'esprit que les industriels produisant des composants (échangeurs, pompes, etc...) achètent de la matière première déjà usinée (tôles, tubes, barres, etc...). Dans une évaluation des coûts de la matière première d'un composant, il faut utiliser les cours des métaux dont l'état initial se rapproche le plus de son aspect final. Ce type d'approche est directement issu d'approches industrielles d'évaluation de précision et d'analyse des coûts de production dans l'industrie [FOU06].

5.3.2 – Modèle de coût pour la turbomachine électrogène

L'évaluation économique de la turbomachine (voir tableau annexes A V-1) permet d'identifier les fonctions de coût à développer pour les composants. Le tableau V-2 représente le degré de prise en compte des conditions de fonctionnement, d'estimation de taille ou de calcul forfaitaire, dans l'expression de la fonction de coût. Les conditions de fonctionnement (températures, pressions, débits, etc...) sont directement fournies par CYCLOP, et suffisent pour permettre l'estimation des coûts de la majorité des composants.

Deux exceptions subsistent néanmoins :

- les échangeurs de chaleur nécessitent une estimation de la surface d'échange pour pouvoir calculer leur coût. La méthode du pincement moyen logarithmique [B2342] consiste à calculer une surface d'échange en connaissant les températures

d'entrée et sortie (cotés chaud et froid), sa puissance et son coefficient de transfert global. Le coefficient de transfert global est calculé à l'aide d'un prédimensionnement : on utilisera des feuilles COPERNIC pour le récupérateur et les refroidisseurs afin d'établir un prédimensionnement de référence (voir [GOM08],

- l'assemblage final de la turbomachine représente 10,2 % (étude [FOU05]) du coût total de la turbomachine. Le calcul sera donc fonction du coût des composants internes.

Tableau V-2 – Sensibilité des fonctions coûts de la turbomachine électrogène.

Poste de coût.	Conditions de fonctionnement	Estimation de taille	Forfaitaire
<i>Conteneur</i>	X		
<i>Echangeurs</i>			
Récupérateur He/He	X	X	
Precooler	X	X	
Intercooler	X	X	
<i>Turbomachine (turbine + compresseurs)</i>			
Turbine	X		
Compresseur BP	X		
Compresseur HP	X		
Alternateur	X		
<i>Circulation de l'hélium</i>	X		
<i>Support, arbre et paliers</i>	X		
<i>Assemblage final</i>			X

La phase de création d'une nouvelle fonction de coût doit suivre les cinq étapes définies dans le paragraphe 3.1. L'évaluation des échangeurs de chaleur nécessite une référence de conditions de fonctionnement : cette référence est l'optimum de rendement du cycle direct Hélium (Chapitre IV §4.3.1.1). L'ensemble des fonctions de coût développées est présenté en annexes A 4 et A 5 de la note [GOM08].

5.3.3 – Usines de production d'hydrogène par le cycle Iode-Soufre

5.3.3.1 – Investissement de l'usine

Plusieurs études ont été menées au sein du CEA sur le coût d'investissement de l'usine de production d'hydrogène par le cycle Iode-Soufre. Une première étude [GIL06] s'est fondée sur un schéma de référence, et a conduit à une estimation du coût de production de l'hydrogène supérieure à l'objectif initialement envisagé pour être compétitif avec les procédés classiques non émetteurs de CO₂ actuellement mis en œuvre. Une deuxième étude [GIL07] est partie d'hypothèses plus optimistes sur l'efficacité et les conditions de

fonctionnement ; l'économie potentielle réalisée correspond à une réduction de l'ordre de 35% du coût initialement proposé, principalement à cause d'une utilisation moindre de matériaux nobles. D'autres travaux d'évaluation du coût d'investissement sont encore actuellement en cours, mais nous avons retenu comme hypothèse, pour notre étude, le chiffre issu de la deuxième étude, à savoir un investissement de 89,95 M€ (2005) par usine, produisant chacune 100 mol/s de H₂.

5.3.3.2 – Coût de fonctionnement

On peut distinguer plusieurs types de maintenance : l'inspection de routine, révisions programmées, réparation urgentes et occasionnelles. Pour les industries lourdes, comme la pétrochimie, on estime que la maintenance est évaluée à 4% / an [CHA01] de l'investissement de l'installation.

D'autres sources [PET03] donnent une estimation de la maintenance en fonction du type de procédé :

- procédé chimique simple : 2 – 6 %,
- procédés moyens : 5 – 9 %,
- procédés complexes (corrosion importante, pressions élevées ...) : 6 – 11 %.

Compte tenu de la problématique de couplage, on ne pourra pas considérer dans l'absolu que les coûts de maintenance du cycle Iode-Soufre et du cycle de conversion d'énergie sont identiques. Compte tenu des conditions de fonctionnement, un premier réflexe impliquerait de choisir la valeur élevée, soit 11%. Les travaux en cours sur les matériaux visent à augmenter la durée de vie des composants jusqu'à 30 ans. De plus, la fiabilité des composants est au standard du nucléaire. On considérera que le cycle Iode-Soufre en fin de développement sera suffisamment fiable pour le placer dans la valeur basse des procédés complexes.

On prendra une valeur optimiste en considérant que la maintenance des usines représente 6 % de l'investissement.

5.3.4 – Conduites de transport d'hélium

L'estimation du coût des conduites de transport d'hélium est biaisée par le manque d'informations fiables sur l'isolant ASH 60. Seule la conduite en acier a pu être évaluée [PAR04] : cette étude ne permet pas d'évaluer le coût de canalisation de plus de 42 pouces de diamètre (1067 mm). Le diamètre de la conduite en acier est de 1400 mm de diamètre, soit 55 pouces. On utilisera tout de même les valeurs extrapolées d'un diamètre de 42 pouces, pour de l'acier 9Cr, en considérant que les prix moyens de l'acier ont subi une augmentation d'un facteur 1,8 de 2001 à 2007.

Le coût actualisé des conduites en acier 9Cr est de 1696 €/m en 2007. Ce coût comprend le prix de la matière, l'installation et les droits de douane. Pour chaque réacteur, on suppose que l'on prend deux conduites de 200 m chacune : les conduites représentent donc un coût fixe de 678400 € ce qui paraît faible si l'on considère que ne sont pas pris en compte l'impact de l'isolant, ni les coûts de fabrication de telles conduites.

5.3.5 – Récapitulatif des fonctions de coût développées

Les fonctions de coûts spécifiques ont été développées pour deux composants principaux : la turbomachine électrogène (tableau V-3) et l'échangeur de chaleur intermédiaire IHX (tableau V-4). Ces fonctions permettent de calculer le coût des composants en fonctions des conditions opératoires issues du résultat des calculs du logiciel CYCLOP, qui permet de simuler la turbomachine et l'échangeur intermédiaire.

L'expression de ces fonctions de coût est générale, et elle peut être modifiée par la suite, en fonction de la pertinence des variables impliquées.

Tableau V-3 - Décomposition des coûts de fabrication de la turbomachine.

Composants	Variables descriptives
<i>Conteneurs</i>	W_{elec} (MW)
	P_{Max} (Bar)
<i>Échangeurs</i>	
Récupérateur He/He	$\Delta\theta_{ml}$ en °C
	P_{Max} (Bar)
Precooler	$\Delta\theta_{ml}$ en °C
Intercooler	P_{Max} (Bar)
<i>Turbomachine (turbine + compresseurs)</i>	
Turbine	P_e (Bar)
	$W_{Turbine}$ (MW)
	η_{IS}
Compresseur BP	P_s (Bar)
Compresseur HP	$W_{Compresseur}$ (MW)
	η_{IS}
Alternateur	W_{elec} (MW)
<i>Circulation de l'hélium (tuyauterie interne)</i>	W_{elec} (MW)
	P_{Max} (Bar)
<i>Support, arbre et paliers</i>	W_{elec} (MW)

Tableau V-4 - Décomposition des coûts de fabrication de l'échangeur intermédiaire (IHX).

Composants	Variables descriptives
Conteneurs	W_{Th} (MW), P_{Max} (Bar)
Échangeurs	$\Delta\theta_{ml}$ en °C, P_{Max} (Bar)
Circulateur primaire	
Soufflante	$W_{Soufflante}$ (MW), rP
Moteur électrique	$W_{Soufflante}$ (MW)
Circulation de l'hélium	W_{Th} (MW)
(Tuyauterie interne)	P_{Max} (Bar)
Support, arbre et paliers	W_{elec} (MW)

5.4 – Expression du critère d'optimisation économique final

5.4.1 – Objectifs généraux

L'évaluation économique des systèmes de cogénération doit prendre en compte les composants impliqués dans la conversion et intégrés au sein d'infrastructures. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle global de SEMER pour quantifier l'ensemble des coûts d'un site nucléaire afin d'évaluer le coût de production de l'énergie. Conformément à la méthodologie de développement de SEMER, le modèle global le plus proche du cas à étudier doit être recherché. Comme il n'existe pas de modèle global du VHTR dans SEMER, on optera pour le modèle du GT-MHR, dont la température de sortie réacteur est plus basse de 850 °C au lieu de 950 °C pour le VHTR mais présente une puissance identique de 600 MW.

Le modèle sera modifié en remplaçant les modèles détaillés par les nouvelles fonctions de coût des composants du système de cogénération étudié. In fine, les modifications doivent permettre d'évaluer le critère d'optimisation retenu dans le cadre de la démarche d'optimisation proposée : le coût total d'un site de cogénération d'électricité et d'hydrogène.

5.4.2 – Modifications du modèle GT-MHR : adaptation à la cogénération

Le modèle global du GT-MHR est fourni pour le scénario économique suivant :

- la puissance du réacteur : 600 MW thermique
- le nombre de tranches par site : 4
- la cadence de construction : 6/an
- le nombre total de réacteurs construits : 20
- la durée de construction : 3 ans
- la durée d'appel : 8760 h
- la durée de vie du réacteur : 60 ans
- taux d'intérêt, taux d'actualisation : 8%

La première hypothèse est de considérer que la durée de vie des composants du système de cogénération, y compris les usines de production d'hydrogène, est de 60 ans. Il n'y a pas de changements de composant sur la durée de vie du site. Cette hypothèse réduit considérablement la complexité du problème, car la durée de vie des composants n'est plus un paramètre.

La modification du modèle global s'opère en trois phases :

1. modification des modèles de coût des différents postes de coût SEMER,
2. expression du critère d'optimisation : sont distingués les coûts du combustible, de l'exploitation de la zone nucléaire (réacteur, turbomachine, IHX), de l'exploitation de zone de production d'hydrogène, et le coût investi par site,
3. expression du coût de production exergetique de l'électricité et de l'hydrogène

Les fonctions de coût sont valables pour l'année 1992. SEMER corrige ces coûts, via un indice de mise à jour constant de +2,4%/an. On aboutit, à la fin de toutes ces modifications, à un nouveau modèle global de SEMER : modèle VHTR en mode cogénération électricité-hydrogène.

Le calcul du coût total pour chaque poste nécessite le calcul du coût annuel. On suppose que le coût annuel est invariant sur l'ensemble des années d'exploitation. Cette hypothèse est fondée sur le principe que les composants et le site lui-même ont la même durée de vie. Le coût total pour un site est le cumul du coût total pour chaque poste.

Un facteur correctif, tenant compte de l'actualisation des prix, est utilisé pour le calcul du coût total sur la durée de vie : l'expression générale est donnée par les équations V-6 et V-7. L'ensemble des équations, nécessaires au calcul du coût total du site, sont réunies sur la note technique [GOM08], et permettent le calcul du critère d'optimisation grâce aux équations générales V-6 et V-7.

$$CT_i^{2007} = c_i^{kWh2007} \times \frac{P_{ai}}{1000} \sum_{t=1}^D (1+I)^{-t} \quad (V-6)$$

$$CT_{Site}^{2007} = \sum_{i=1}^4 CT_i^{2007} \quad (V-7)$$

Avec :

CT_i : Coût total sur la durée de vie du poste « i » (M€2007)

$c_i^{kWh2007}$: Part du poste « i » dans le coût de production (€/kWh 2007)

P_{ai} : Production annuelle d'énergie liée au poste « i » (MWh/an 2007)

I : Taux d'actualisation (8%)

D : Durée de vie (60 ans)

5.5 - Conclusions

La conception des fonctions de coût des composants, ainsi que la création d'un modèle SEMER spécifique au problème de cogénération, permet de calculer le critère économique : le coût total sur la durée de vie d'un site de 4 réacteurs VHTR. Chaque réacteur est couplé à une turbomachine électrogène et à un nombre variable d'usines de production d'hydrogène, à l'aide d'un échangeur de chaleur intermédiaire, ou IHX (*Intermediate Heat EXchanger*).

La turbomachine est basée sur le principe du cycle de Brayton, avec une compression du gaz en deux étapes. Cette turbomachine se place en cycle direct avec l'hélium caloporteur du réacteur. La sûreté d'un tel composant par rapport aux accidents de dépressurisation, croissant avec la pression, nécessite des recherches sur l'impact économique d'une telle variable. Les modèles économiques des composants principaux (turbine, compresseurs, échangeur et enceinte pressurisé) sont des expressions simples. Des recherches ont été menées afin de déterminer des coefficients correcteurs pertinents. Le calcul de coût de la turbine et des compresseurs est effectuée à partir de [SCH74]. Des modèles de coût spécifiques sont développés en utilisant une étude technique détaillée de la turbomachine [FOU05].

Les échangeurs de chaleur, notamment plaques-ailettes, font l'objet d'un développement particulier. Très peu de données sont disponibles pour cette technologie d'échangeur. Des données technico-économiques disponibles sur les échangeurs en aluminium [LUN06] et l'analyse du procédé de fabrication permettent de formuler un premier modèle. Le modèle est sensible à la masse des ailettes et au volume global et permet de prendre en compte plusieurs types de métaux en utilisant les cours actuels ainsi que leur difficulté d'usinage. Une telle flexibilité permet d'intégrer les calculs de tenue mécanique [BLA06] pour prendre en compte l'effet de la pression sur la masse des échangeurs. Le calcul du coût nécessite un prédimensionnement de l'échangeur, en utilisant des conditions de référence. Puis, dans une seconde phase, ce coût est mis en relation avec la surface d'échange pour déterminer un coût surfacique des différents échangeurs : ce coût surfacique est ainsi sensible à pression en utilisant des calculs de tenue mécanique. Cette démarche a été appliquée aux échangeurs de la turbomachine ainsi qu'à l'IHX et peut être étendue à d'autres composants de même technologie.

L'échangeur de chaleur intermédiaire bénéficie des retombées de l'analyse technico-économique menée dans les présents travaux, notamment pour les modules d'échange de chaleur. La sensibilité du modèle à la pression est prépondérante pour ce composant primaire qui joue le rôle de barrière entre le réacteur et la distribution de chaleur vers les usines de production d'hydrogène. La production d'hydrogène a été étudié dans [GIL06,GIL07] donnant une première estimation de l'investissement pour une usine produisant 100 mol/s d'hydrogène. L'investissement total est donc proportionnel au nombre d'usines.

Le critère économique d'optimisation retenu est le coût total d'un site, sur sa durée de vie, et nécessite la création d'un nouveau modèle SEMER. L'investissement des composants principaux utilise les modèles spécifiquement développés en première partie de ce chapitre. Les coûts supplémentaires, mais prépondérants, tels que l'exploitation et la maintenance et le coût du combustible sont évalués grâce au retour d'expérience d'EDF sur le parc des REP

français [NIS03] intégré dans le modèle SEMER et modifié spécifiquement pour la cogénération. Le modèle développé, adapté au contexte nucléaire, permet de calculer le coût total pour une durée de vie de 60 ans de l'ensemble des systèmes [CHA01].

Les études technico-économiques menées dans ces travaux se basent sur des données techniques précises et l'ensemble des hypothèses formulées lors de la création des modèles de coût permet d'avoir une base solide pour de futures études. Les fonctions de coût n'ont fait l'objet d'aucune action de validation, de même que le calcul du coût total : les résultats ne doivent donc pas être considérés comme une base décisionnelle. Elles utilisent cependant les études les plus avancées disponibles à ce jour. Les mêmes remarques s'appliquent au modèle global SEMER proposé dans ce chapitre.

Ce chapitre insiste également sur l'aspect méthodologique de la création des fonctions de coût : ces travaux constituent également un guide pour les études technico-économiques préliminaires.

CHAPITRE VI

Optimisation multicritère des systèmes énergétiques : étude de scénarii et résultats

6.1 - Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'appliquer la méthodologie d'optimisation multicritère par Algorithmes Génétiques des systèmes de conversion d'énergie, développée au cours des chapitres précédents : production unique d'électricité, cogénération électricité/hydrogène et production unique d'hydrogène), en vue de proposer une aide à la décision par rapport à l'ensemble des scénarii qui pourraient être envisagés. Compte tenu du fort degré d'interconnexion, il est nécessaire de disposer d'une méthode d'évaluation des systèmes de cogénération, objectif principal de ce mémoire.

Ce chapitre se décompose en deux parties :

- la première propose les étapes clés de la méthodologie d'optimisation, qui fait appel aux outils développés spécifiquement dans le cadre de ce travail (bibliothèque MULTIGEN) et ceux directement issus du CEA (CYCLOP, COPERNIC) ou adaptés (SEMER). Une première phase consiste en une optimisation bi-critère des systèmes, par la minimisation des pertes/destructions exergétiques totales (chapitres III et IV) et par la minimisation du coût total des sites de production sur leur durée de vie (chapitre V). Les solutions optimales sont ensuite choisies, à l'aide de scénarii sur le coût de l'électricité, en déterminant un coût de production,
- la seconde partie présente, analyse et compare les trois exemples d'application de la méthodologie qui constituent la finalité de ce travail de thèse,
 - la première étude concernant la production unique d'électricité met en œuvre une optimisation de la turbomachine électrogène retenue (voir chapitre I §1.1.2.1). Elle permet de mener une étude de sensibilité des variables d'optimisation afin de retenir celles qui agiront en tant que variables d'optimisation définies est proposée,
 - en tenant compte de ces éléments, les résultats relatifs à la cogénération sont présentés, analysant le couplage entre le cycle électrogène et les usines de production d'hydrogène,
 - enfin, un dernier volet s'intéressera à la production exclusive d'hydrogène.

6.2 – Méthodologie d'optimisation technico-économique des systèmes de cogénération

La modélisation et la simulation des systèmes de cogénération font appel à l'utilisation de CYCLOP [HAU04]. Après avoir retenu les variables d'optimisation, l'optimisation bicritère portera sur la minimisation simultanée des pertes/destructions exergétiques de l'ensemble du système (calcul automatique CYCLOP), du coût total du site de production sur sa durée de vie (utilisation modèle SEMER HTR modifié) : le couplage de ces outils est représenté sur la figure VI-1. Le développement de ces deux critères a fait l'objet des chapitres II et IV

respectivement. Rappelons que le critère économique tient compte à la fois du coût de la construction des sites (composants de conversion d'énergie + environnement d'exploitation) et des coûts de fonctionnement (combustible, maintenance zone nucléaire + production H2) pour une durée de vie de 60 ans.

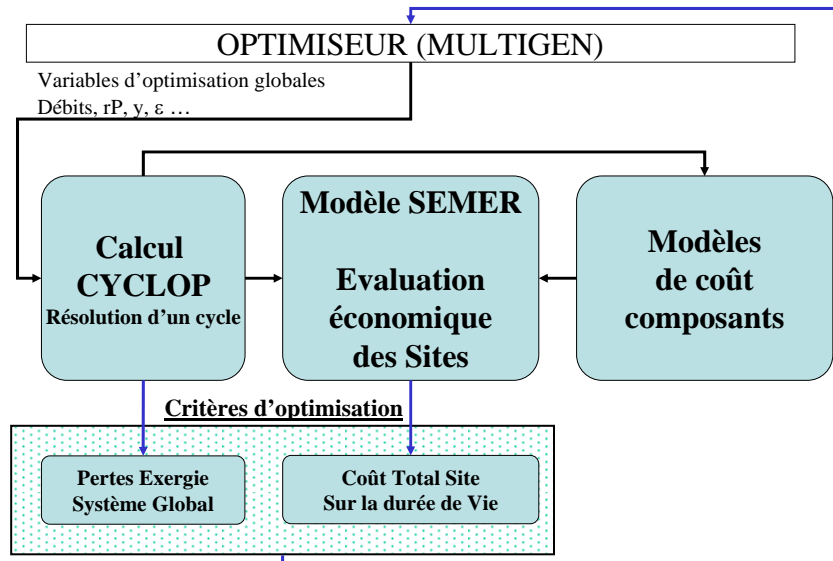


Figure VI-1 - Outils et processus d'optimisation bi-critère des systèmes de cogénération

L'optimisation bicritère du système conduira à un ensemble de solutions de compromis entre pertes/destructions d'exergie et coût total du système.

De ces critères d'optimisation, sont déduits des critères décisionnels, à partir desquels les stratégies de production pourront être déterminées. Le calcul de ces critères est relégué à ce stade car il dépend de paramètres conjoncturels. Un des points forts de la méthodologie est de ne pas intégrer directement ces paramètres dans l'optimisation : un tel procédé risquerait de biaiser le résultat final, et priver les décideurs d'une partie des solutions.

Un premier calcul consiste à déterminer le coût de production de l'énergie produite grâce à l'expression suivante :

$$C_{Prod} (\text{€} / kWh) = \frac{CT_{Site}}{\sum_{t=1}^D \left[\frac{Pa(t)}{1000} (1+i)^{-t} \right]} \quad (\text{VI-1})$$

$$CT_{Site} = \sum_{t=1}^D \left[Ca_{Combustible}(t) + Ca_{Exploitation}(t) + Ca_{Investis}(t) \right] \times (1+i)^{-t} \quad (\text{VI-2})$$

La production annuelle d'énergie est considérée constante, d'où l'expression :

$$C_{Prod} (\text{€} / kWh) = \frac{CT_{Site}}{\frac{Pa}{1000} \sum_{t=1}^D [(1+i)^{-t}]} \quad (\text{VI-3})$$

Elle est directement liée à l'efficacité énergétique du système, donc à ses pertes/destructions exergetiques (critère d'optimisation à minimiser).

Dans le cas où plusieurs formes d'énergie sont produites (électricité et hydrogène par exemple), l'expression de la production annuelle d'énergie est la suivante :

$$Pa = N_{Tranches} \times \tau_{Disponibilité} \times D_{appel} \times \left[W_e + \dot{n}_{H_2/Tranche} \times P_{Ex}(H_2) \right] \quad (VI-4)$$

Compte tenu de l'utilisation du pouvoir exergetique de l'hydrogène, le coût de production obtenu est « exergetique » également. Cette expression est classique pour une production électrique seule. Ici, les kWh électricité et hydrogène sont identiques en valeurs.

A ce stade de la démonstration, le coût de production est toujours « exergetique » Comme souligné par F. Werkoff [WER05], il n'existe pas de marché pour le concept d'exergie, mais seulement pour l'énergie. Il est donc nécessaire de traduire ce coût de production en valeur énergétique.

Dans le cas particulier de l'hydrogène, l'unité de prix la plus fréquemment utilisée s'exprime en €/kg, et à pour expression :

$$C_{Prod}^{H_2} (\text{€ / kg}) = \frac{P_{EX}(H_2)}{M(H_2)} \times \frac{C_{Prod}(e / kWh)}{3600} \quad (VI-5)$$

Avec :

$C_{Prod}^{H_2} (\text{€ / kg})$: Coût de production de l'hydrogène en équivalent pouvoir exergetique (€/kg)

$P_{EX}(H_2)$: Pourvoir exergetique molaire (J/mol)

$M(H_2)$: masse molaire de l'hydrogène (kg/mol)

$C_{Prod}(e / kWh)$: Coût de production exergetique de l'hydrogène et de l'électricité (€/kWh)

Comme les systèmes de cogénération sont plus complexes que ceux produisant de l'électricité seule, et que la présence de deux systèmes distincts de production d'énergie conduit à un surcoût, le coût de production de l'électricité est fatalement plus élevé si l'hydrogène est produit simultanément. L'utilisation de l'exergie implique que le coût de production des deux formes d'énergie est indifférencié, c'est-à-dire que le surcoût lié à la production d'hydrogène se répercute sur le coût de l'électricité.

Le coût de production de l'hydrogène est obtenu en fixant le coût de production de l'électricité selon l'équation suivante :

$$C_{Prod}^{H_2} (e / kg)_{Scénario} \times \dot{m}_{H_2} + 1000 \times W_e \times C_{Prod}^{elec} (e / kWh)_{Scénario} = C_{Prod} (\text{€ / kWh}) \times W_{Ex} \quad (VI-6)$$

Avec :

W_{Ex} :	Puissance exergetique de l'hydrogene et de l'electricite produits
(kW)	
W_e :	Puissance électrique produite (kW)
$C_{Prod}(\text{€} / kWh)$:	Coût de production exergetique de l'hydrogene et de l'electricite
(€kWh)	
\dot{m}_{H_2} :	Production horaire d'hydrogene du site (kg/h)
$C_{Prod}^{H_2}(\text{€} / kg)_{Scenario}$:	Coût de production de l'hydrogene pour un scenario donne
(€kg)	
$C_{Prod}^{elec}(\text{€} / kWh)_{Scenario}$:	Coût de production de l'electricite fixe par le scenario (€kg)

Cette équation traduit une répartition du coût de production global sur les deux formes d'énergie produites. Le coût de production de l'hydrogene est déduit de celle de l'electricite qui sera fixe à l'aide de scénarios.

En résumé, l'optimisation technico économique et l'évaluation du coût de production nécessitent trois phases :

- **Phase 1** : optimisation bi-critère par minimisation des pertes/destructions exergetiques sur le systeme et minimisation du coût total sur la durée de vie du site (modèle SEMER) puis calcul d'un coût de production exergetique (en €kWh) de l'hydrogene et de l'electricite (identique pour les deux).
- **Phase 2** : calcul du coût de production de l'hydrogene en €kg (équivalent pouvoir exergetique de H₂) en utilisant l'équation 5.
- **Phase 3** : calcul du coût de production de l'hydrogene en €kg, par fixation du prix de vente au reseau de l'electricite, en utilisant l'équation 6. L'objectif est de répartir les coûts de production entre les deux énergies produites.

Cette démarche sera strictement appliquée aux exemples qui suivent.

6.3 – Application de la méthodologie au couplage d'un cycle électrogène avec la production d'hydrogene par le cycle Iode-Soufre

La méthodologie décrite est appliquée à l'optimisation d'un site de 4 réacteurs VHTR (par analogie au concept d'implantation du projet GT-MHR [GA96]) d'une durée de vie de 60 ans. Le premier exemple traite de la production électrique à l'aide de la turbomachine électrogène décrite dans le chapitre I (§1.1.2.1) : l'objectif est de déterminer les variables

pertinentes. Cette réduction des variables permet de réaliser l'étude du système de cogénération, puis de production d'hydrogène.

6.3.1 – Scénario économique retenu

Le modèle global SEMER du VHTR nécessite les données économiques suivantes :

- Nombre de tranches par site : 4
- Nombre total de tranches construites : 20
- Durée de construction : 3 ans
- Durée de vie : 60 ans
- Taux d'intérêt : 8%
- Taux d'actualisation : 8%
- Durée d'appel : 8760 heures/an
- Salaire mensuel moyen : 1906 €/mois

Le nombre maximal de tranches construites est fixé à 20 : il s'agit de la limite de validité des corrélations sur l'effet de série dans SEMER. La durée d'appel représente le nombre d'heures de disponibilité nécessaires. Un taux de disponibilité du réacteur est calculé par le modèle SEMER : soit 77,2 %. Les appointements mensuels correspondent au salaire moyen du personnel : la valeur donnée ci-dessus n'a pas été réactualisée depuis 1992 et une forte incertitude pèse sur cette valeur, on conservera néanmoins cette valeur pour les calculs.

Ce modèle global valable pour la cogénération d'électricité et d'hydrogène, est simplifié dans le cas d'une production d'électricité (1^{er} exemple) ou d'hydrogène (2^{ème} exemple).

Les optimisations sont réalisées avec MULTIGEN, répétées trois fois sur un PC Pentium Core 2 Duo 2 Go RAM : l'examen des fronts de Pareto montre qu'une seule optimisation s'avère suffisante. Le problème ne comportant que des variables continues, c'est l'algorithme NSGA Iib qui est utilisé. La population comporte 500 individus sur 250 générations (suffisant pour la convergence du front de Pareto), un taux de croisement de 90% et un taux de mutation de 50% ont été utilisés.

6.3.2 – Optimisation d'un site de VHTR 100% dédiés électricité

Dans ce cas, seules les deux premières phases de la démarche proposée sont utiles.

6.3.2.1 – Description du système

Le système optimisé consiste à coupler un réacteur VHTR à la turbomachine présentée dans le chapitre I (figure VI-3). Cette turbomachine a déjà fait l'objet d'une étude de sensibilité des variables d'optimisation potentielles (voir chapitre III §3.1.1.2) sur le critère d'optimisation énergétique (minimisation des pertes/destructions d'exergie). Un premier jeu de variables d'optimisation est considéré dans le tableau V 1 (chapitre V).

Les contraintes sur la turbomachine sont les suivantes :

- température d'entrée du réacteur ≤ 480 °C,
- prérefroidisseur : débit H₂O (kg/s) / Surface d'échange (m²) $\leq 1000 / 1958,75^2$,
- refroidisseur intermédiaire : débit H₂O (kg/s) / Surface d'échange (m²) $\leq 1000 / 1823,06^2$,
- température de sortie du pré refroidisseur $\leq 60,7$ °C [GA96]³,
- température de sortie du refroidisseur intermédiaire $\leq 52,1$ °C [GA96]³.

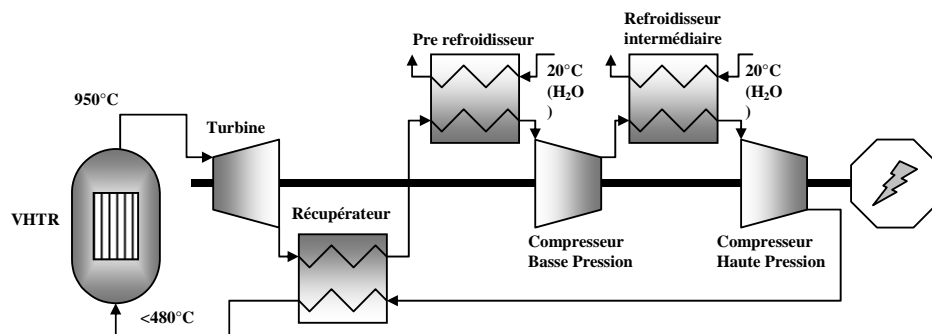


Figure VI-3 – Modèle de la turbomachine

Tableau VI-1 – Variables d'optimisation de la turbomachine

Variable d'optimisation	Borne minimum	Borne maximum
Pression sortie réacteur	50 bar	130 bar
Rapport de détente turbine	1	5
η_{IS} turbine	60%	94%
Rapport compression basse pression	1	5
η_{IS} compression basse pression	60%	90%
η_{IS} compression haute pression	60%	90%
Efficacité récupérateur	40%	98%
Débit refroidissement pré refroidisseur	0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée compresseur basse pression	26 °C	80 °C
Débit refroidissement refroidisseur intermédiaire	0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée compresseur haute pression	26 °C	80 °C

6.3.2.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système et analyse de sensibilité des variable

6.3.2.2.1 – Analyse de sensibilité des variables

L'optimisation bi-critère pour le jeu complet permet d'obtenir le front de Pareto ci-dessous (figures VI-4 et VI-5). Ce front peut être comparé à celui correspondant à une pression de sortie du réacteur fixée de 70 bar. Le rendement augmente avec la pression à la sortie du réacteur : ce résultat est logique d'un point de vue thermodynamique. D'un point de

² On conserve ainsi le régime d'écoulement dans les échangeurs de refroidissement

³ Températures maximales préconisées cf p 4-88

vue économique, les coefficients correcteurs de pression donnent un ensemble de valeurs comprises entre 70 et 130 bar. La pression est conservée comme variable d'optimisation.

Globalement, on observe que les fronts sont confondus jusqu'à un rendement de 50,5 %. Au delà, le front de Pareto, à pression variable, présente une forte progression du rendement par rapport au coût total, dû à une sur-sensibilité de certaines variables, i.e., les efficacités de la turbine, des compresseurs et des échangeurs. Pour l'ensemble des solutions du front de Pareto (figure VI-4), l'efficacité isentropique de la turbine atteint sa valeur maximale de 94 %. Des solutions de compromis ne peuvent pas être trouvées à l'aide du coefficient correcteur proposé pour la turbine. Or, le même type de coefficient correcteur est utilisé pour les compresseurs : il sera également supprimé car ce type de correction et son impact sont mis en doute par l'exemple de la turbine. Les efficacités isentropiques devront être fixées.

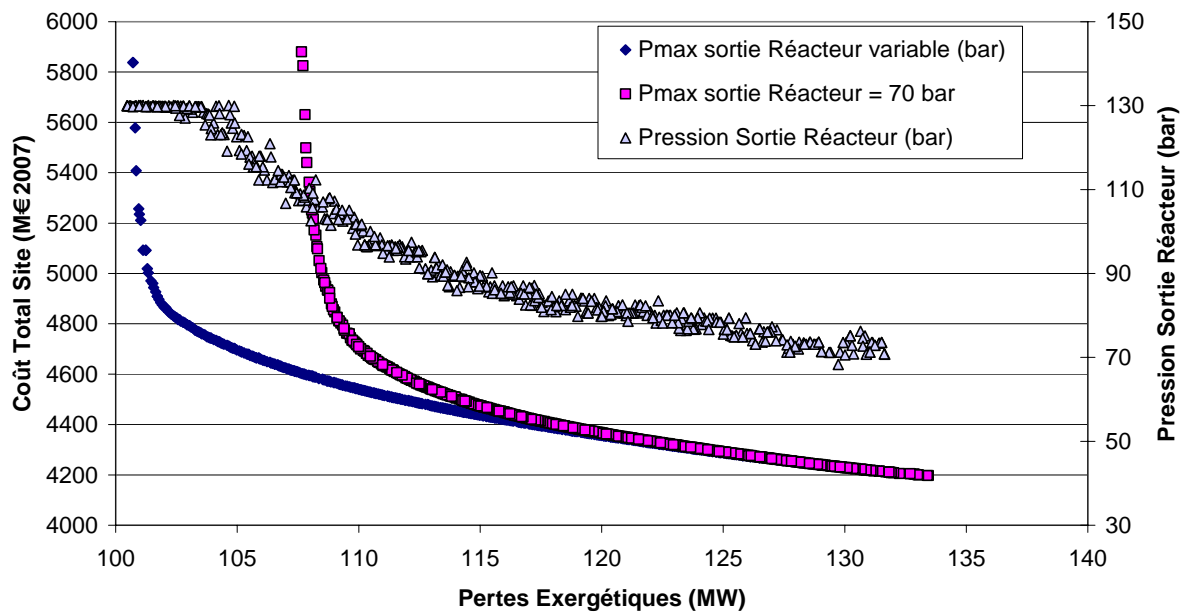


Figure VI-4 – Front de Pareto pour le jeu complet de variables d'optimisation (exergie)

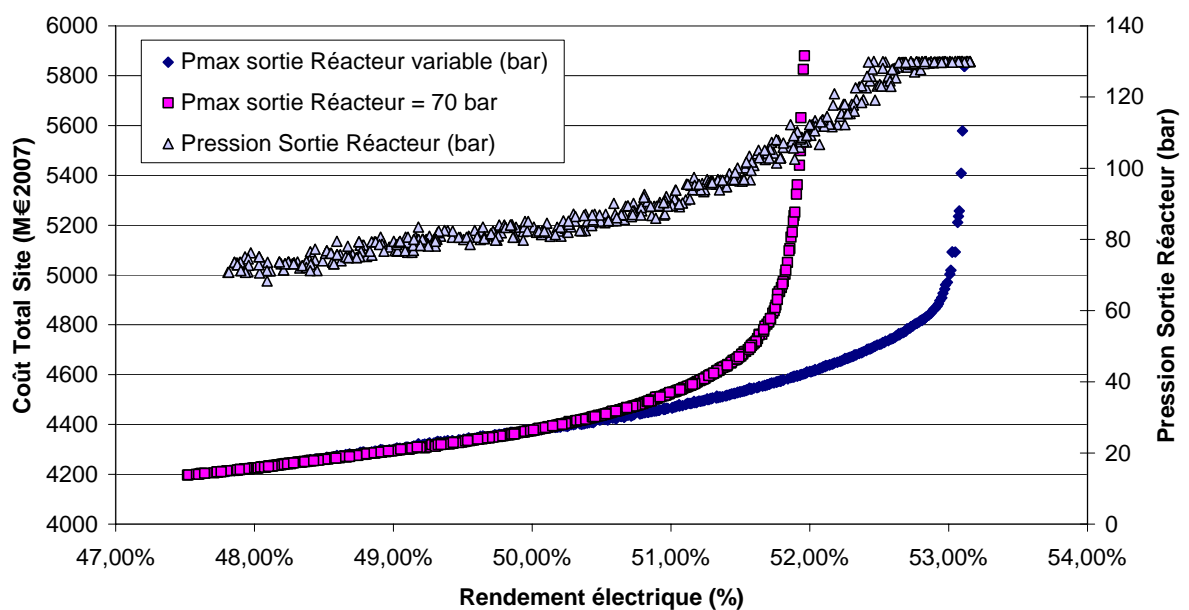


Figure VI-5 – Front de Pareto pour le jeu complet de variables d'optimisation (rendement)

Les températures d'entrée des compresseurs permettent de contrôler l'efficacité des refroidisseurs : elles atteignent la valeur minimale de 26 °C imposée lors de l'optimisation. L'hypothèse consistant à fixer le coefficient de transfert global des refroidisseurs est en cause : la figure VI-6 montre clairement que la surface d'échange n'est pas assez sensible à la température d'entrée des compresseurs. Un prédimensionnement réalisé à l'aide du modèle COPERNIC, montre que la surface d'échange, et donc le coefficient de transfert global, sont très sensibles à la température d'entrée des compresseurs. L'efficacité des refroidisseurs, en tant que variables d'optimisation, ne permettent pas d'obtenir des solutions de compromis et seront fixées pour les études suivantes. L'efficacité du récupérateur est conservée car elle constitue une variable clé dans l'optimisation.

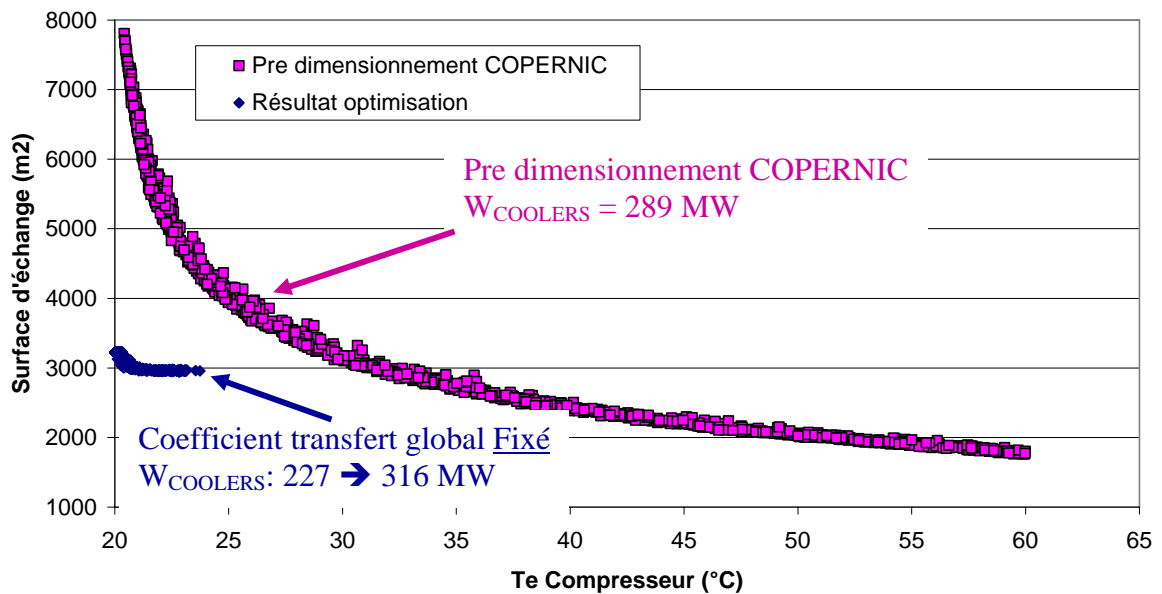


Figure VI-6 – Influence de la température d'entrée compresseur sur la surface des refroidisseurs

6.3.2.2.2 – Optimisation avec les variables d'optimisation retenues

Les variables suivantes (voir tableau VI-2) sont désormais fixées pour l'étude qui suit, avec pour objectif de minimiser les pertes exergétiques et le coût total sur la durée de vie. Deux cas sont comparés, un premier cas avec une pression fixée à 70 bar, et un second où cette pression est une des variables d'optimisation.

Sur les figures VI-7 et VI-8, on note que le front de Pareto est moins étendu que sur les figures VI-4 et VI-5, du fait de l'élimination des variables d'efficacité de la turbine, des compresseurs et des refroidisseurs. Le rendement maximum atteint est de 51,5% (figure VI-7). Le maintien de la pression comme variable est à l'origine de la différence avec le front de Pareto à pression fixée tout comme dans le cas précédent, mais la divergence s'opère à une valeur légèrement inférieure de 49,5%. Cependant, ces résultats confirment leur sensibilité envers la pression : ceci constitue un axe de recherche technico-économique. L'efficacité du récupérateur de chaleur est une variable clé du système car elle est directement liée au rendement et sa limite maximale (98%) correspond au rendement maximum atteint.

L'étape suivante doit maintenant permettre de sélectionner la solution optimale pour ce système.

Tableau VI-2 – Variables d'optimisation pertinentes de la turbomachine

Variable d'optimisation	Valeurs fixées	Borne minimum	Borne maximum
Pression sortie réacteur		50 bar	130 bar
Rapport de détente turbine		1	5
η_{IS} turbine	93%		
Rapport compression basse pression		1	5
η_{IS} compression basse pression	88%	-	-
η_{IS} compression haute pression	88%	-	-
Efficacité du récupérateur		40	98
Débit refroidissement du prérefroidisseur		0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée du compresseur basse pression	26 °C	-	-
Débit refroidissement du refroidisseur intermédiaire		0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée du compresseur haute pression	26 °C	-	-

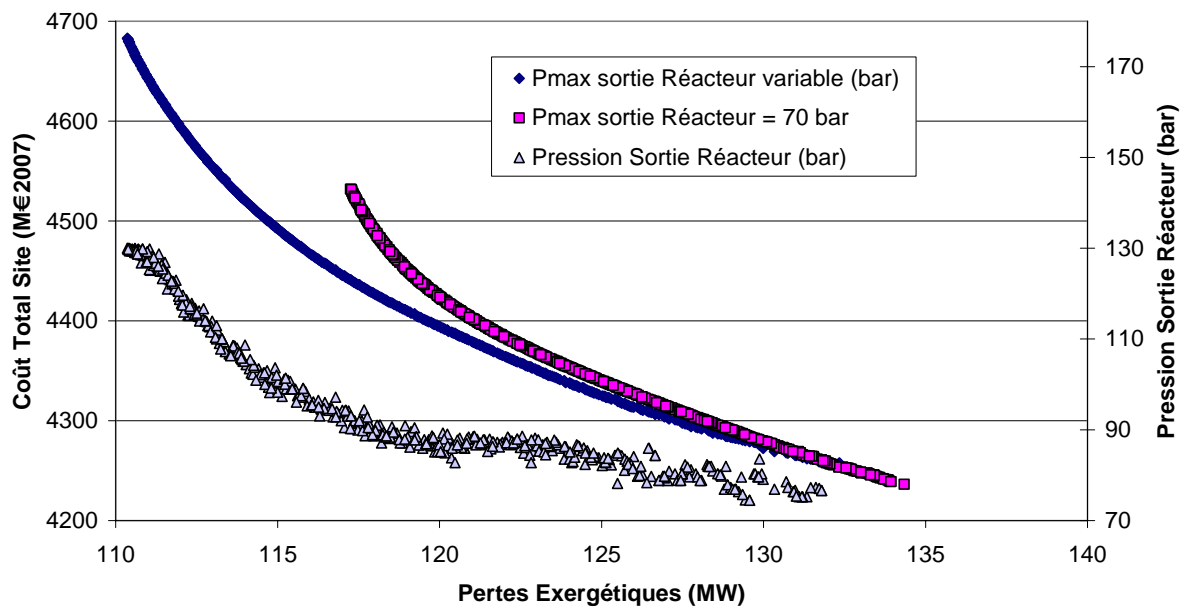


Figure VI-7 – Front de Pareto pour le jeu de variables d'optimisation final (exergie)

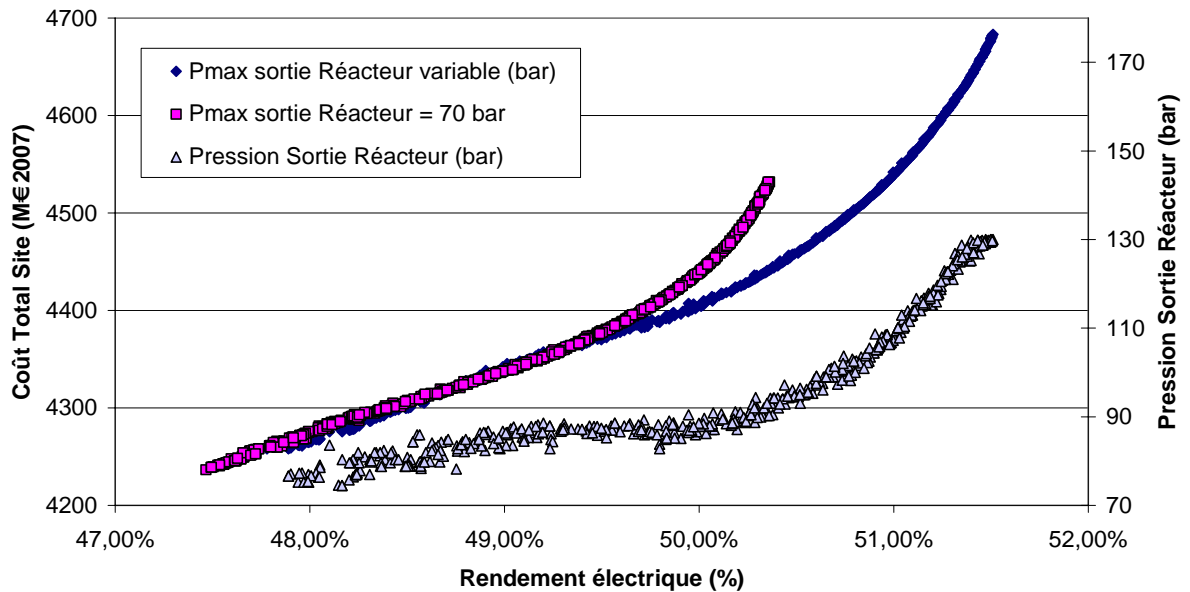


Figure VI-8 – Front de Pareto pour le jeu de variables d’optimisation final (rendement)

6.3.2.3 – Phase 2 : calcul du coût de production de l’électricité

Cette étape a pour objectif de calculer le coût de production exergétique de l’électricité, en utilisant l’équation VI-3. La figure VI-9 présente un minimum de coût de production de 4,38 c€/kWh pour un rendement de 49,98 %. L’utilisation de la pression comme variable induit un gain de 0,6 % sur le rendement et de 0,02 c€/kWh pour l’électricité, ce qui faible. La pression correspondante est de 85,9 bar. Le coût du kWh se situe dans la gamme des estimations disponibles pour ce concept GT-MHR. La pression comme variable ne permet pas d’obtenir un gain important sur le rendement et le coût.

Les résultats seront interprétés de façon plus complète dans le paragraphe suivant.

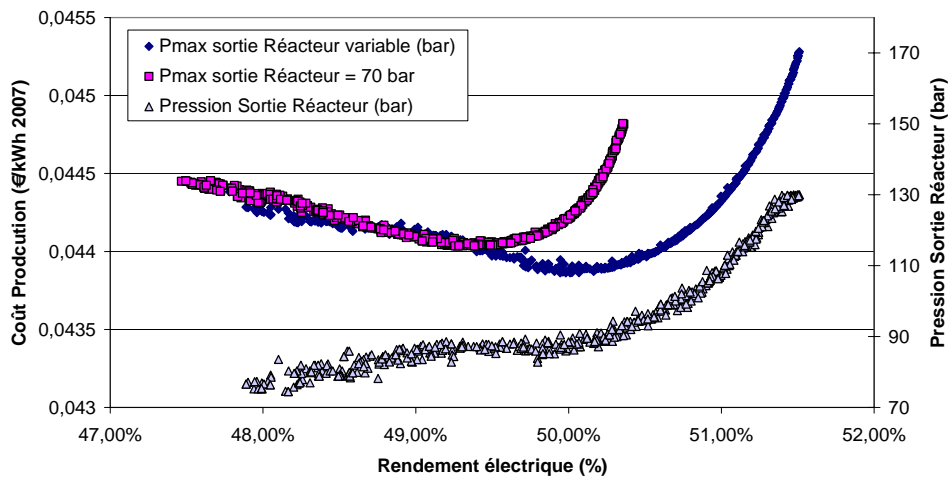


Figure VI-9 – Coût de production de l’électricité en fonction du rendement

6.3.2.4 – Analyse des résultats

La répartition des coûts pour la durée de vie (critère d'optimisation) est représentée sur la figure VI-10 : les sommes investies représentent 63 % du coût total, alors que l'exploitation et le combustible en représentent respectivement 21 % et 16 %. Cette répartition correspond à l'ordre de grandeur admis pour les réacteurs du parc REP français. Le coût de la turbomachine représente 178 M€ soit 6 % des investissements, et 4 % du coût total du site. Les fonctions de coût créées pour la turbomachine n'ont que peu d'impact sur le coût de production de l'électricité de 4,39 c€/kWh.

Le coût des composants optimisés (turbine, compresseurs, échangeurs, alternateur, voir figure VI-11) ne représente que 42 % de l'investissement de la turbomachine, alors qu'ils représentaient 65,7 % dans une étude technique préalable (voir chapitre V, annexes tableau A V-1). Ceci est dû à l'utilisation des fonctions de coût pour les échangeurs plaques-ailettes, qui permettent de réduire l'investissement de 66,5 M€ à 18,5 M€ soit une réduction d'un facteur 3,6. Des incertitudes pèsent donc sur l'évaluation de la turbomachine. Les résultats de telles optimisations ne peuvent fournir que des indications sur les conditions opératoires optimales, et l'impact des technologies utilisées sur les coûts de production.

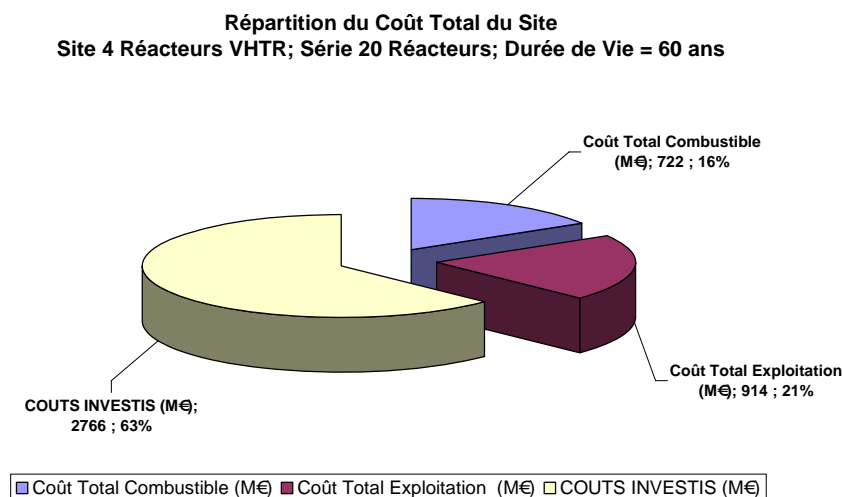


Figure VI-10 – Coût total d'un site de 4 réacteurs VHTR (production électrique)

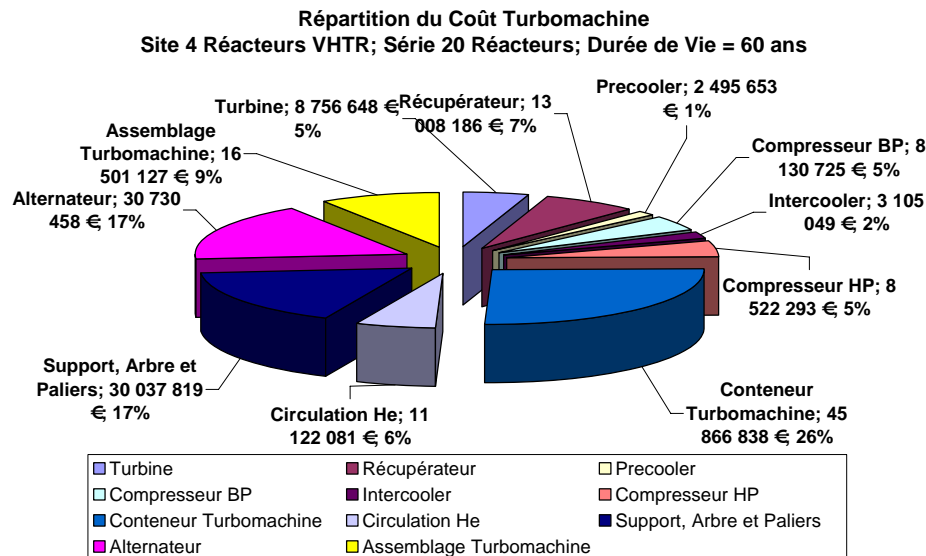


Figure VI-11 – Répartition du coût des composants pour la turbomachine (production électrique)

6.3.3 – Optimisation d'un site de VHTR en cogénération électricité hydrogène

6.3.3.1 – Description du système

Le système de cogénération étudié ici consiste à coupler un réacteur VHTR à la turbomachine en cycle direct, d'une part, et à un ensemble d'usines de production d'hydrogène (cycle Iode-Soufre) dont les demandes thermique et électrique sont connues.

L'optimisation technico-économique porte sur un site de 4 tranches autonomes, chacune comprenant un réacteur VHTR, une turbomachine et n usines de production d'hydrogène (figure VI-12), L'excédent de production électrique est basculé sur le réseau.

Compte-tenu de l'étude précédente, les variables d'optimisation pertinentes de la turbomachine sont représentées dans le tableau VI-3.

Les contraintes imposées sont :

- Température d'entrée du réacteur ≤ 480 °C
- prérefroidisseur : débit H_2O (kg/s) / Surface d'échange (m^2) $\leq 1000 / 1958,75^4$
- refroidisseur intermédiaire : débit H_2O (kg/s) / Surface d'échange (m^2) $\leq 1000 / 1823,06^4$
- Température de sortie du prérefroidisseur $\leq 60,7$ °C [GA96]⁵
- Température de sortie du refroidisseur intermédiaire $\leq 52,1$ °C [GA96]⁵
- Efficacité du récupérateur de chaleur $\leq 98\%$

⁴ On conserve ainsi le régime d'écoulement dans les refroidisseurs

⁵ Températures maximales préconisées cf p 4-88 du rapport [GA96]

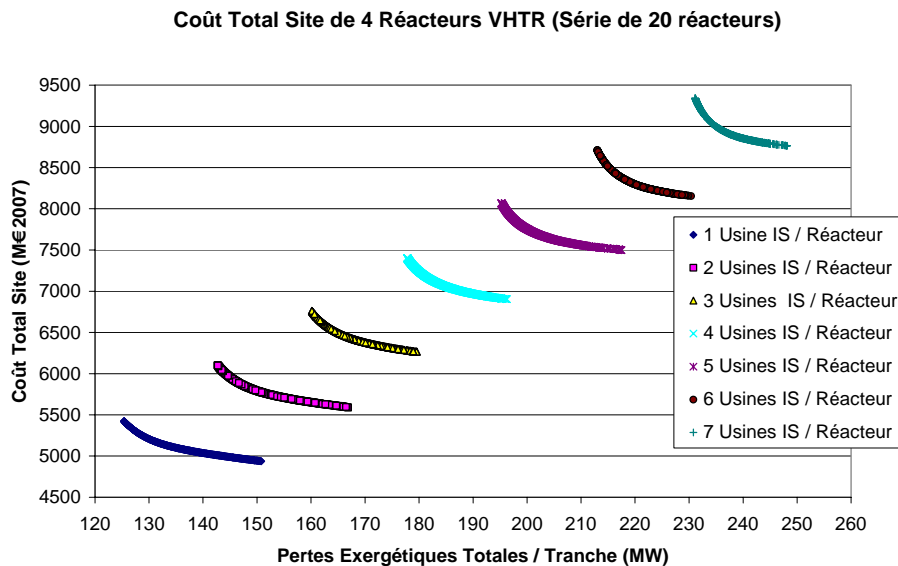
Compte-tenu du fort déséquilibre de rendement entre la production électrique et la production d'hydrogène (en défaveur de la production d'hydrogène, voir chapitre IV §4.3.3) on fait varier le nombre d'usines/réacteur de 1 à 7 : 7 usines est la limite d'autonomie électrique du site ; en effet, au-delà, il est nécessaire d'importer de l'électricité du réseau.

Tableau VI-3 – Variables d'optimisation pertinentes de la turbomachine

Variable d'optimisation	Valeurs fixées	Borne minimum	Borne maximum
Pression sortie réacteur		50 bar	130 bar
Rapport de détente turbine		1	5
η_{IS} turbine	93%		
Rapport compression basse pression		1	5
η_{IS} compression basse pression	88%	-	-
η_{IS} compression haute pression	88%	-	-
Efficacité IHX		50	98
Débit refroidissement pré refroidisseur		0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée compresseur basse pression	26 °C	-	-
Débit refroidissement refroidisseur intermédiaire		0 kg/s	1000 kg/s
Température d'entrée compresseur haute pression	26 °C	-	-

6.3.3.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système

L'optimisation bi-critère permet d'obtenir l'ensemble des solutions de compromis entre les deux critères (voir figure VI-12).



On calcule alors le coût de production exergétique de chaque solution, à l'aide de l'équation VI-3.

D'après la figure VI-12, pour un nombre donné d'usines I-S, il existe une solution à coût de production exergétique minimum : cette solution correspondant à un coût de production minimal d'électricité doit être sélectionnée. Les solutions optimales sont rassemblées dans les tableaux VI-4 et VI-5 : on y relève la production d'hydrogène, d'électricité, la pression de sortie optimale du réacteur, les variables d'optimisation de la turbomachine, le coût total du site ainsi que le coût de production exergétique et l'électricité et de l'hydrogène (même valeur).

On observe que les productions d'hydrogène et d'électricité sont liées par une relation linéaire. On note également que la réduction de la production électrique, conséquence de l'augmentation de la production d'hydrogène s'accompagne d'une diminution de pression en sortie du réacteur. Cette diminution est due à l'augmentation du rendement de la turbomachine : il augmente lorsque la demande interne des usines de production augmente. L'augmentation du rendement de la turbomachine a pour corollaire une augmentation du coût de production : la diminution parallèle de la pression en sortie du réacteur permet de limiter au maximum l'augmentation de coût de la turbomachine.

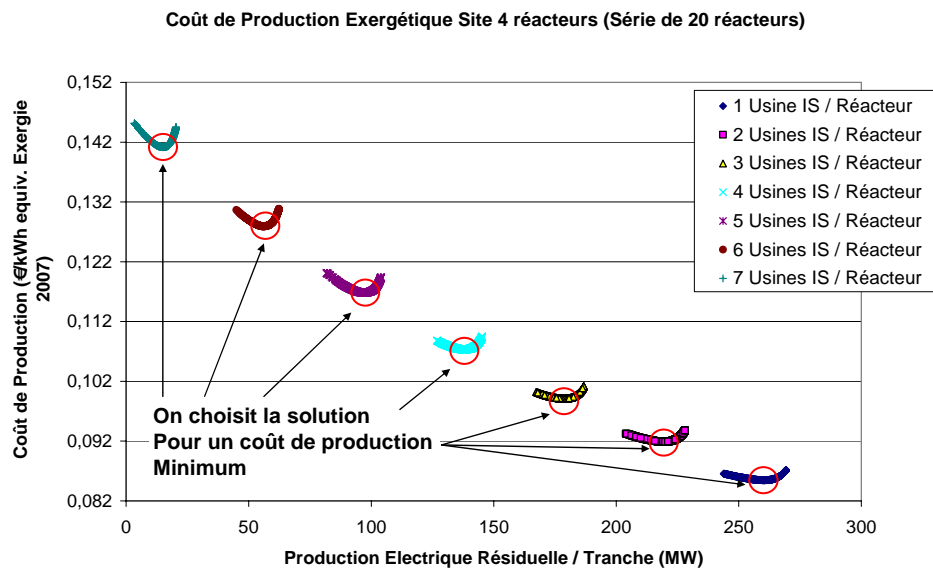


Figure VI-13 - Coût de production exergétique des solutions optimales

Tableau VI-4 - Solutions optimales pour un coût de production exergétique minimum

Nbr Usines IS /Réacteur	Production Totale H ₂ (T/jour)	Production Électrique Totale (MW)	Pression Sortie VHTR (bar)	rP Turbine	Efficacité IHX (%)	Débit H ₂ O Precooler (kg/s)
1	69,12	1042	82,38	3,551	90,9	896
2	138,24	877	80,27	3,522	91,8	793
3	207,36	714	77,96	3,512	92,4	689
4	276,48	552	77,89	3,446	93,4	603
5	345,60	388	74,91	3,375	93,9	513
6	414,72	224	73,32	3,285	93,9	435
7	483,84	60	72,73	3,104	94,4	327

Tableau VI-5 – Solutions optimales pour un coût de production exergetique minimum

Nbr Usines IS /Réacteur	rP Compresseur BP	Débit H2O Intercooler (kg/s)	Pertes Exergie /Tranche (MW)	Coût Total Site (M€)	Coût de Production exergie (€/kWh)
1	1,947	906	134	5115	0,0855
2	1,977	827	152	5758	0,0919
3	1,956	727	168	6409	0,0991
4	1,931	628	185	7056	0,1073
5	1,934	541	202	7690	0,1168
6	1,880	430	219	8315	0,1279
7	1,856	359	237	8937	0,1412

6.3.3.3 - Phase 2 : calcul du coût de production de l'hydrogène en €/kg (équivalent Pouvoir Exergetique)

L'objectif de cette phase est de convertir le coût de production de l'hydrogène, initialement exprimé en €/kWh, en un coût en masse, en €/kg.

Le coût de production exergetique de l'hydrogène est donc recalculé (tableau VI-6), et représenté sur la figure VI-14. À ce stade, l'électricité et l'hydrogène sont à la fois, sur le même plan énergetique, et sur le même plan économique : une linéarité due à la proportionnalité des deux productions est observée. Le coût de production de l'électricité est ici largement plus élevé que les coûts moyens admis en France (autour de 33 €/MWh).

L'utilisation de l'exergie implique que le coût de production des deux formes d'énergie ne soit pas différencié, c'est-à-dire que le surcoût lié à la production d'hydrogène se répercute sur le coût de l'électricité. Une nouvelle répartition peut être faite en fixant le coût de l'électricité, en fonction de scénarios fictifs, pour déduire celui de l'hydrogène : c'est le but de la phase 3.

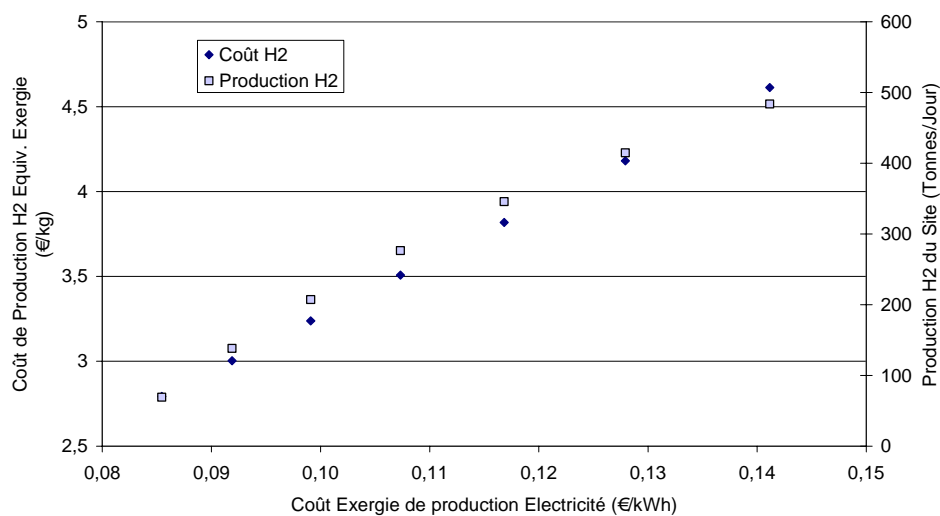


Figure VI-14 – Coût de production exergetique de l'électricité et de l'hydrogène

Tableau VI-6 - Coût de production exergie de l'hydrogène, en €/kg, pour les solutions optimales

Nbr Usines IS /Réacteur	Production Totale H ₂ (T/jour)	Production Électrique Totale (MW)	Pertes Exergie /Tranche (MW)	Coût Total Site (M€)	Coût de Production électricité (€/kWh)	Coût de Production Exergie Hydrogène (€/kg)
1	69,12	1042	134	5115	0,0855	2,79
2	138,24	877	152	5758	0,0919	3,00
3	207,36	714	168	6409	0,0991	3,24
4	276,48	552	185	7056	0,1073	3,51
5	345,60	388	202	7690	0,1168	3,82
6	414,72	224	219	8315	0,1279	4,18
7	483,84	60	237	8937	0,1412	4,61

6.3.3.4 – Phase 3 : fixation du prix de vente de l'électricité

Le coût de production de l'hydrogène est de nouveau graduel en utilisant les scénarios de vente fictif de l'électricité (voir tableau VI-7a et b) entre 0 et 0,1 €/kWh. Les tableaux VI-7a et b fournit les coûts de production de l'hydrogène pour chacune des solutions optimales.

On constate clairement, sur la figure VI-13 qu'il existe un optimum du coût de production de l'hydrogène (cellules grisées tableau VI-7a et b) : ces points sont représentés sur les figures VI-15a et b. Le prix de l'électricité cédée au réseau croît entre le scénario 1 (0 €/kWh) et le scénario 11 (0,10 €/kWh). Un dernier scénario donne le coût de production de l'électricité pour un coût de production de l'hydrogène nul.

On note que lorsque le prix de l'électricité cédée augmente (voir figure VI-15a), le coût de production de l'hydrogène diminue logiquement, mais l'optimum correspond à des productions décroissantes en hydrogène. Ce comportement est tout à fait logique. Dans le scénario 1, l'électricité est cédée gratuitement au réseau : le système a tout intérêt à produire un maximum d'hydrogène, et un minimum d'électricité en excès. Dans le scénario 11, au contraire, le prix de l'électricité vendue au réseau est plus élevée (0,10 €/kWh) : le système a intérêt à produire un maximum d'électricité.

Tableau VI-7a Coût de production hydrogène, en €/kg (site de 4 réacteurs, scénarios de prix de l'électricité proposés)

Prod élec (MW)	-	1042	877	714	552	388	224	60
Prod H2 (mol/s)	Scénario Prix Électricité (€/kWh)	400	800	1200	1600	2000	2400	2800
Prod H2 (kg/s)		0,8	1,6	2,4	3,2	4	4,8	5,6
Prod H2 (T/J)		69,12	138,24	207,36	276,48	345,6	414,72	483,84
Scénario 1	0,00	10,526	6,499	5,287	4,793	4,605	4,595	4,718
Scénario 2	0,01	9,621	6,118	5,080	4,673	4,538	4,563	4,710
Scénario 3	0,02	8,716	5,738	4,873	4,554	4,470	4,530	4,703
Scénario 4	0,03	7,811	5,357	4,667	4,434	4,403	4,498	4,695
Scénario 5	0,04	6,907	4,977	4,460	4,314	4,336	4,466	4,688
Scénario 6	0,05	6,002	4,596	4,254	4,194	4,268	4,433	4,681
Scénario 7	0,06	5,097	4,216	4,047	4,074	4,201	4,401	4,673
Scénario 8	0,07	4,192	3,836	3,840	3,955	4,133	4,368	4,666
Scénario 9	0,08	3,287	3,455	3,634	3,835	4,066	4,336	4,659

Tableau VI-7b Coût de production hydrogène, en €/kg (site de 4 réacteurs, scénarios de prix de l'électricité proposés)

Prod élec (MW)	-	1042	877	714	552	388	224	60
Prod H2 (mol/s)	Scénario Prix Électricité (€/kWh)	400	800	1200	1600	2000	2400	2800
Prod H2 (kg/s)		0,8	1,6	2,4	3,2	4	4,8	5,6
Prod H2 (T/J)		69,12	138,24	207,36	276,48	345,6	414,72	483,84
Scénario 10		0,09	2,383	3,075	3,427	3,715	3,998	4,304
Scénario 11	0,10	1,478	2,694	3,220	3,595	3,931	4,271	4,644
Scénario marché 1	0,0222	8,52	5,65	4,83	4,53	4,46	4,52	4,70
Scénario marché 2	0,0284	7,96	5,42	4,70	4,45	4,41	4,50	4,70
Scénario marché 3	0,0330	7,54	5,24	4,60	4,40	4,38	4,49	4,69
Scénario marché 4	0,0343	7,42	5,19	4,58	4,38	4,37	4,48	4,69
Scénario marché 5	0,0350	7,36	5,17	4,56	4,37	4,37	4,48	4,69
Scénario marché 6	0,0701	4,18	3,83	3,84	3,95	4,13	4,37	4,67
Scénario H2 Gratuit ==> Prix électricité (€/kWh)		0,116	0,171	0,256	0,400	0,683	1,418	6,380

Des scénarii correspondant aux prix de l'électricité du marché donnent une production optimale d'hydrogène de 345,6 T/jour pour une gamme de prix compris entre 4,37 et 4,46 €/kg.

Les figures VI-15a et b permettent de choisir la solution correspondant à un coût de production d'hydrogène souhaité : le coût de production de l'électricité, la production d'hydrogène et d'électricité en sont déduits. Les flèches sur les figures VI-15a et b indiquent un mode de lecture : pour un coût de 4 €/kg d'hydrogène, le site de production optimal produit 207 T/jour d'hydrogène et 710 MW électrique, correspond à un coût de production de l'électricité de 0,06 €/kWh. Si l'on souhaite fixer le coût de production de l'électricité, il suffit d'appliquer la démarche strictement inverse.

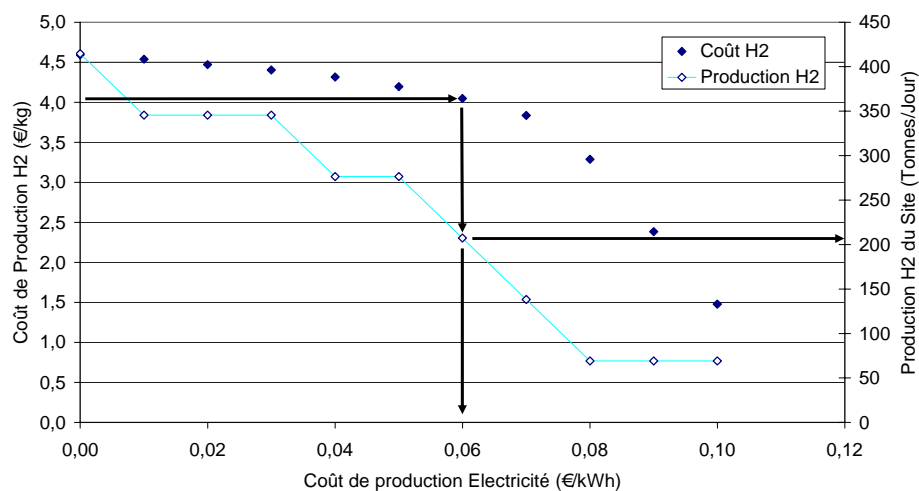


Figure VI-15a – Solutions optimales de coût de production de l'hydrogène

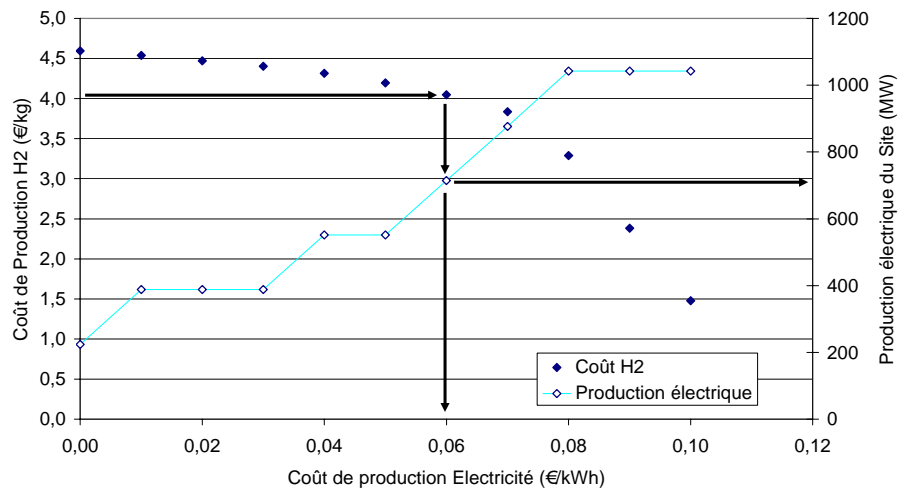


Figure VI-15b – Solutions optimales de coût de production de l'hydrogène

Aucun scénario de demande sur l'hydrogène et l'électricité n'est pris en compte et les productions de chaque site sont limitées. Il faut donc définir une demande prioritaire du marché, ou alors tenir compte simultanément de la demande d'électricité et d'hydrogène en déterminant leur ratio et en choisissant la solution la plus proche. Ce graphe représente les productions d'hydrogène et d'électricité pour chacune des solutions optimales représentées sur les figures VI-15a et b. Dans ce cas, les coûts de production seront imposés au marché.

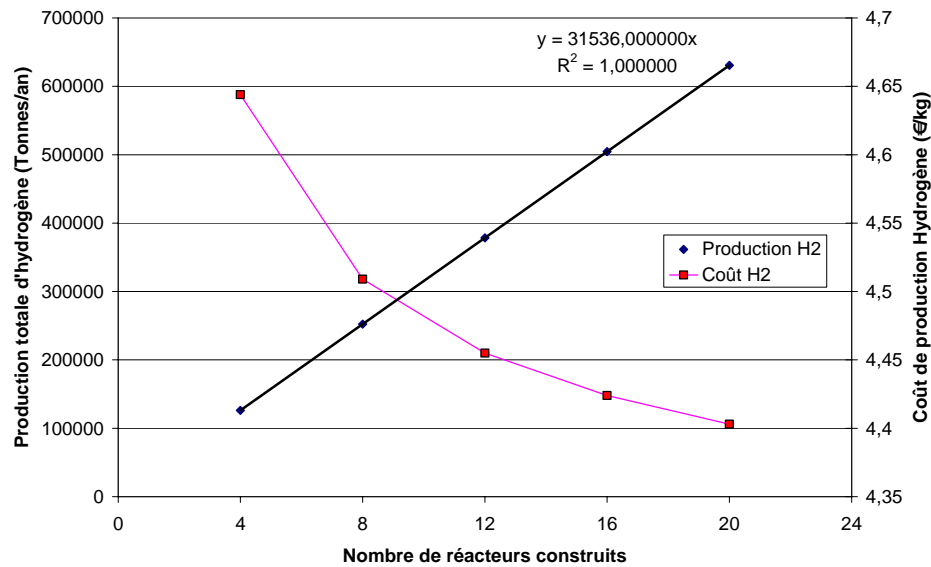
La satisfaction totale du marché peut être assurée par des sites de production d'appoint entièrement dédiés à la production d'hydrogène (exemple suivant §6.3.4) et d'électricité.

6.3.3.5 – Effet de série de la construction des sites sur le coût de l'hydrogène

Les résultats des optimisations réalisées dans ce chapitre sont basés sur la construction d'une série de 20 réacteurs nucléaires. Une telle série permet de réduire le coût unitaire de construction du réacteur, des infrastructures environnantes, et ainsi contribuer à la diminution du coût de production de l'hydrogène. Le modèle SEMER développé pour le système de cogénération (voir chapitre V) prend également en compte le nombre de réacteurs par site : il est fixé à 4 par site par analogie avec la solution d'implantation adoptée pour le concept GT-MHR [GA96]. L'augmentation du nombre de sites augmente donc la production globale d'hydrogène. Cette tendance se vérifie quel que soit le scénario sur le coût de l'électricité. On choisit de représenter l'évolution du coût de production de l'hydrogène pour un prix de l'électricité à 0,03 €/kWh (proche des coûts de production actuel) sur la figure VI-16.

Le coût minimum obtenu pour une série maximale de 20 réacteurs représente une production annuelle de 630720 T d'hydrogène à un coût de 4,4 €/kg. La multiplication par 5 du nombre de réacteurs construits a permis de diminuer de 5,1% le coût de production sur cet exemple. La corrélation d'effet de série implantée dans SEMER n'est plus valide au delà de 20 réacteurs : l'impact d'un déploiement supérieur à ce chiffre ne peut être exploré. De plus,

elle n'est pas validée pour les usines de production d'hydrogène, mais il est certain qu'un tel effet de série existerait également.



**Figure VI-16 – Impact de l'effet de série sur le coût de production de l'hydrogène
(Coût électricité 0,03 €/kWh)**

6.3.4 – Optimisation d'un site de VHTR 100% dédié à l'hydrogène

La méthodologie est appliquée ici à la seule production d'hydrogène. Comme dans le cas de la production d'électricité seule les deux premières étapes de la méthodologie proposée sont applicables.

6.3.4.1 – Description du système et hypothèses

Le système de production 100 % dédié à la production d'hydrogène ne présente que l'échangeur intermédiaire (IHX) et les usines de production d'hydrogène. La demande électrique du site est assurée par le réseau.

L'optimisation technico-économique porte sur un site de 4 tranches autonomes, chacune comprenant un réacteur VHTR, un échangeur intermédiaire et 10 usines de production d'hydrogène. Le nombre de variables d'optimisation est fortement réduit par rapport à l'exemple précédent, à cause de la disparition de la turbomachine.

Les variables d'optimisation sont les suivantes :

- Pression sortie du réacteur : entre 50 et 130 bar
- Efficacité de l'échangeur intermédiaire (IHX) : entre 50% et 98%

Les contraintes imposées sont :

- Température d'entrée du réacteur ≤ 480 °C

Le coût de l'électricité prélevée sur le réseau est ajouté aux frais de fonctionnement annuels du site.

6.3.4.2 – Phase 1 : optimisation bi-critère du système

Les scénarios de coût de l'électricité sont identiques à ceux utilisés pour l'exemple de cogénération (voir tableau VI-7). La consommation électrique des usines de production d'hydrogène est fixée, ce qui signifie que la soufflante de l'échangeur intermédiaire (voir chapitre IV, figure IV-5) est seule à faire varier la consommation d'électricité du système. La puissance de cette soufflante dépend directement des variables d'optimisation.

Pour les scénarii 1 et 11 de coût de l'électricité, on note une simple translation du front de Pareto, avec une égalité des domaines couverts par les variables d'optimisation. Le coût de l'électricité n'influe pas sur l'optimisation. L'ensemble des fronts obtenus est rassemblé sur la figure VI-17.

La figure VI-17 indique, pour chaque scénario, que le minimum du coût de production de l'hydrogène correspond à des pertes/destructions exergetiques maximales. Chacun de ces minima correspond à la même solution pour les variables d'optimisation.

Les variables d'optimisation n'agissent que sur les conditions de fonctionnement de cet échangeur et sur son coût : le meilleur coût de production d'hydrogène correspond donc à un minimum de coût sur se composant.

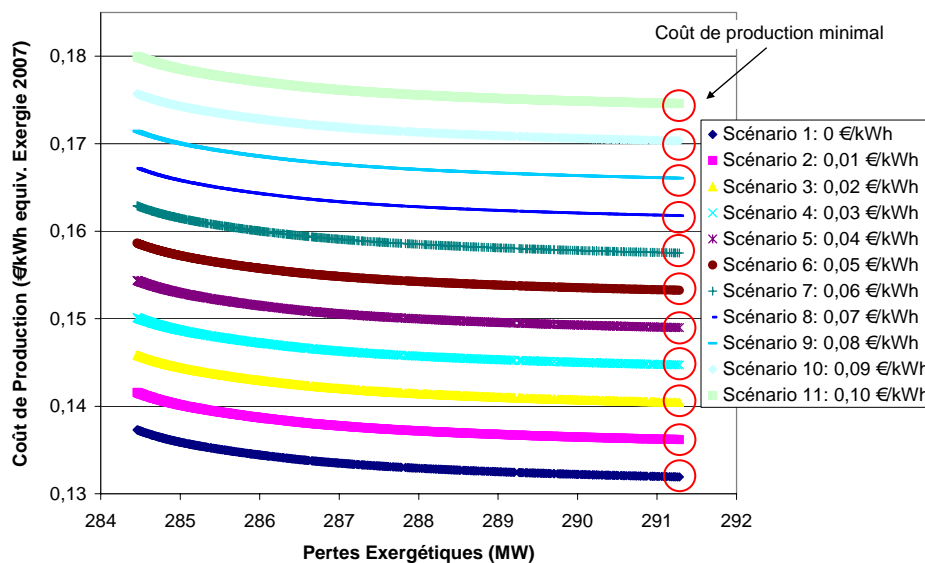


Figure VI-17 – Coût de production exergétique de l'hydrogène

6.3.4.3 – Phase 2 : calcul du coût de production de l'hydrogène en €/kg

Le coût de production de l'hydrogène en €/kg est calculé à l'aide de l'équation VI-5. La figure VI-18 représente les valeurs obtenues pour différents scénarios de coût de l'électricité.

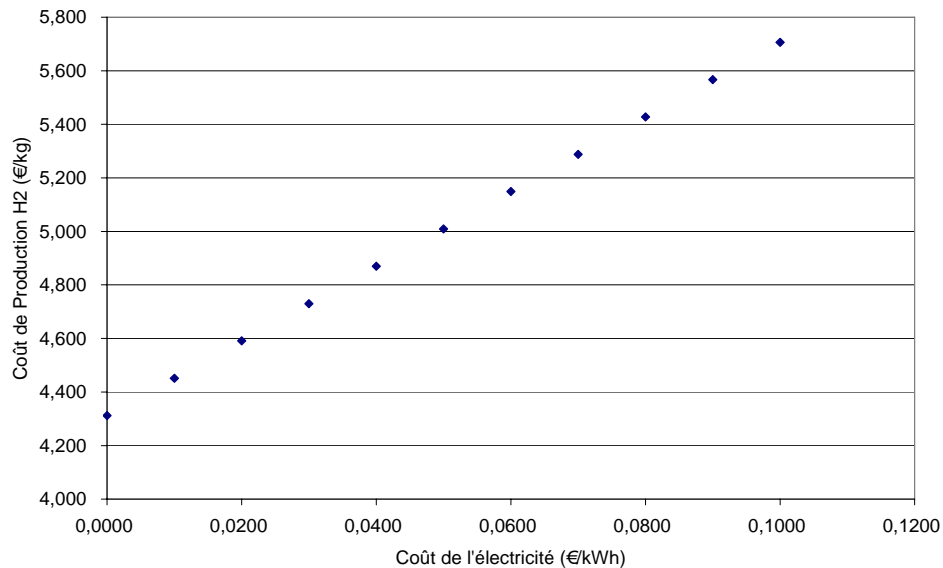


Figure VI-18 – Coût de Production de l'hydrogène pour un site 100% dédié

6.3.4.4 – Répartition des coûts et analyse des résultats

La décomposition des coûts sur la durée de vie du site (figure VI-19) indique que le coût de l'investissement représente 44% du total. Les coûts d'exploitation de la zone de production d'hydrogène (42%) sont prépondérants devant ceux de la zone nucléaire et du combustible (7% chacun). Le coût du combustible ne représente que 7%. Le modèle SEMER estime le coût total à 14548 M€ pour un site produisant 691,2 T/jour d'hydrogène. Le coût des usines de production d'hydrogène (figure VI-20) est majoritaire, avec 90% du coût des composants du système de conversion d'énergie (hors réacteur). L'échangeur de chaleur intermédiaire (IHX), sensible aux variables d'optimisation, ne représente que 10%. L'investissement du site et d'exploitation de la zone de production de l'hydrogène sont du même ordre de grandeur (respectivement 44 et 42%). Toute amélioration du rendement, et de l'investissement des usines Iode-Soufre permettra de réduire significativement le coût de production.

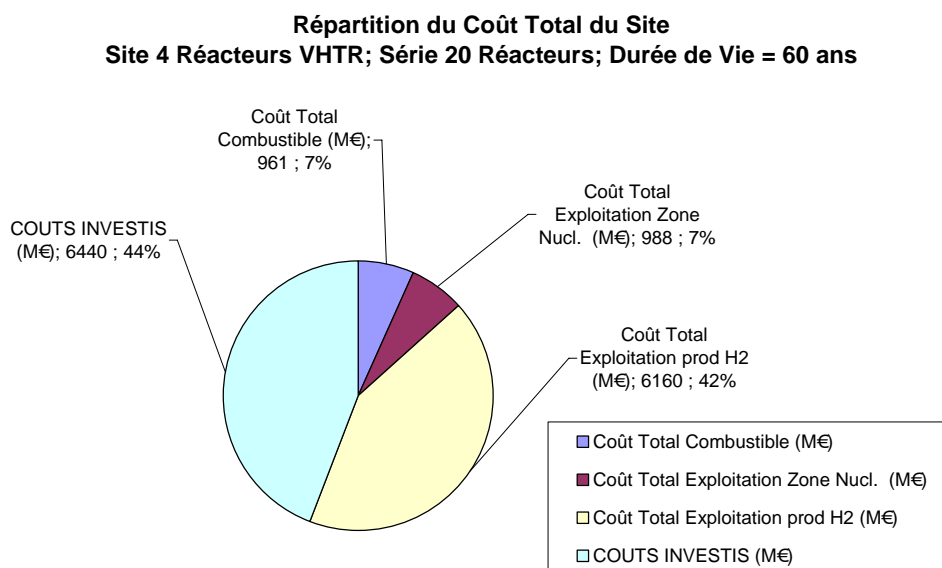


Figure VI-19 – Coût total d'un site de 4 réacteurs VHTR 100% dédié Hydrogène

**Répartition de l'Investissement (Hors Réacteur)
Site 4 Réacteurs VHTR; Série 20 Réacteurs; Durée de Vie = 60 ans**

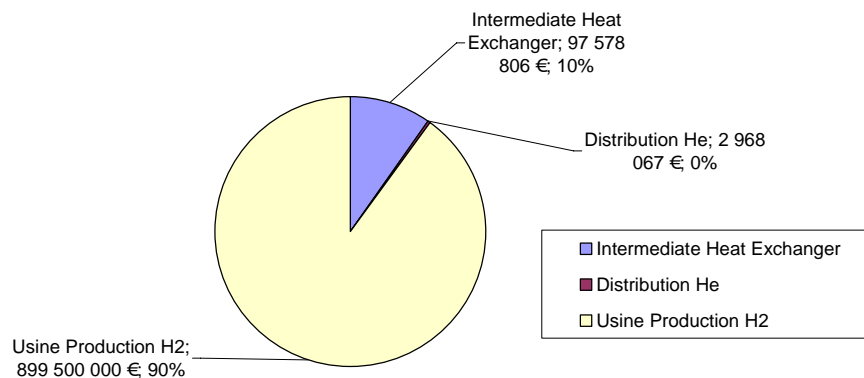


Figure VI-20 – Répartition du coût des composants (site 100% dédié Hydrogène)

Seul l'échangeur de chaleur intermédiaire (IHX) est sensible aux deux critères d'optimisation.

La pression, au minimum du coût de production, est de 70 bar et l'efficacité de l'échangeur intermédiaire (IHX) est de 89,7%. Cette solution correspond à une température d'entrée du réacteur de 480 °C, valeur maximale imposée comme contrainte mais qui correspond à l'efficacité d'échange le plus faible possible. La température de retour de l'hélium de la boucle de distribution est de 400°C et dépend entièrement de la demande de chaleur fixée des usines de production d'hydrogène : l'efficacité est ici minimale. Le coût de l'IHX est d'autant plus important que la pression est élevée (voir figure VI-21) : les coefficients correcteurs du coût en fonction de la pression sont à l'origine de cette tendance.

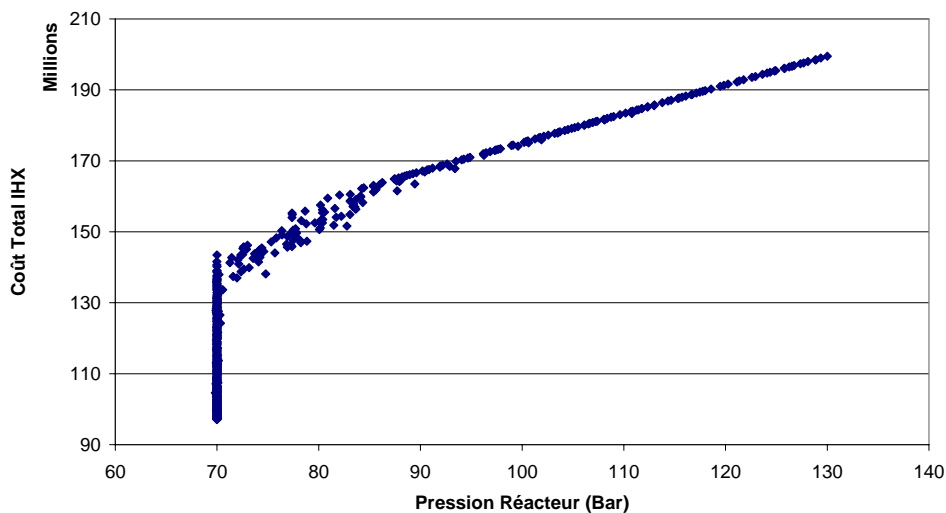


Figure VI-21 – Sensibilité du coût de l'échangeur intermédiaire en fonction de la pression.

En effet, les principaux coûts (surface d'échange, conteneur et assemblage, voir figure VI-22) augmentent avec la pression mais cela n'explique pas le fait que cette variable prenne

une valeur minimale de 70 bar. La borne minimale imposée pour l'optimisation est de 50 bar, mais il est à noter que la pression dans la boucle de distribution est elle fixée à 70 bar. Les coefficients correcteur de coût (voir [GOM08]) considèrent la pression maximale dans le composant : 70 bar est donc la pression la plus faible possible atteignable car elle correspond à la pression de la boucle de distribution de chaleur.

Ce dernier résultat implique que l'optimisation du circuit de distribution de chaleur présente également un intérêt car la diminution de la pression induit un gain économique, mais risque de diminuer l'efficacité exergetique de l'ensemble.

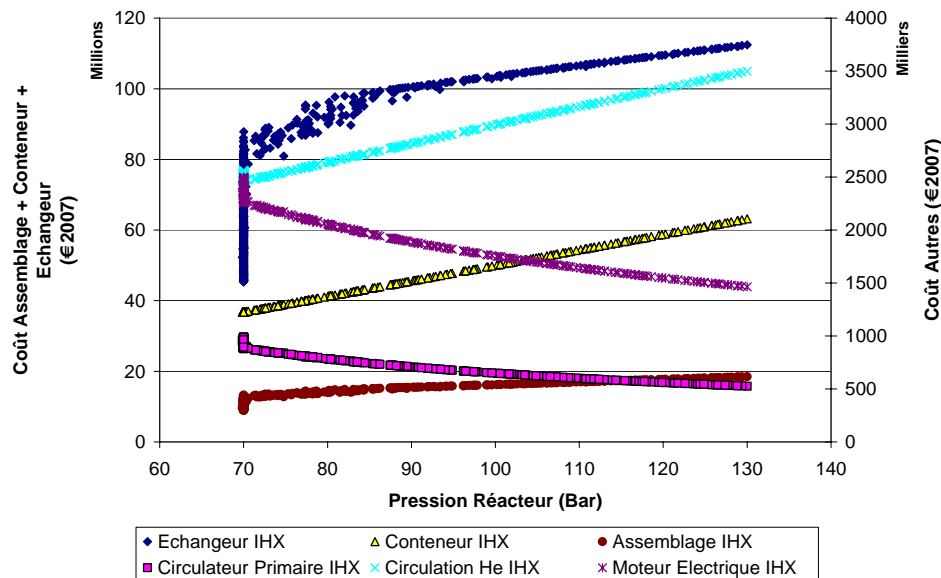


Figure VI-22 – Décomposition du coût de l'échangeur intermédiaire et sensibilité à la pression.

6.4 - Conclusions

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre une méthodologie d'optimisation, puis de sélection des systèmes de cogénération d'électricité et d'hydrogène. La méthode est un enchaînement de 3 étapes.

Cette méthodologie se veut généraliste et a été appliquée à trois systèmes de conversion de la chaleur produite par un réacteur VHTR : la production d'électricité seule, la cogénération d'électricité et hydrogène, et enfin la production d'hydrogène seule.

Selon les types de productions d'énergie, certaines parties du système de conversion présentent un intérêt à être optimisé :

- *Production d'électricité* : tous les composants du cycle électrogène ont vocation à être optimisés. Le critère d'optimisation peut être basé sur les pertes/destructions d'exergie totales (proposées par la méthode) ou simplement sur le rendement.
- *Production d'hydrogène* : les systèmes sont constitués de procédés de production d'hydrogène, d'un circuit de distribution de chaleur et d'un

échangeur intermédiaire avec le réacteur nucléaire. Tous les composants peuvent faire l'objet d'une optimisation mais le plus simple consiste à fixer les caractéristiques du procédé de production d'hydrogène (solution pragmatique car il y a peu d'intérêt à trop complexifier le modèle).

- *Cogénération d'électricité et d'hydrogène* : il s'agit de la synthèse des deux cas précédents. Le cycle électrogène, l'échangeur intermédiaire, et le circuit de distribution de chaleur ont fait l'objet d'une optimisation. Les usines de production d'hydrogène (cycle Iode-Soufre) ont été considérées comme des boîtes noires.

La détermination des variables d'optimisation reste à la charge de l'expert, mais il détermine leur sensibilité sur les critères d'optimisation proposés dans la méthodologie.

La méthodologie comporte trois étapes :

- La première étape consiste en une optimisation bi-critère des systèmes, consistant à minimiser simultanément les pertes/destructions exergetiques et le coût total des sites de cogénération. Cette étape permet de générer l'ensemble des solutions de compromis entre ces deux critères. Devant le grand nombre de solutions possibles, il est nécessaire d'ajouter des critères de sélection. Le coût de production est un des indicateurs primordiaux dans le monde industriel : le calcul du coût de production « exergetique » en €/kWh, global, de l'énergie permet de disposer d'une valeur indépendante du vecteur énergétique (électricité, hydrogène) produit. Parmi l'ensemble des solutions fournies par l'optimisation bi-critère, une seule correspond à un coût de production « exergetique minimum » : cette solution est retenue pour la poursuite de mise en œuvre de la méthodologie.
- La seconde étape correspond à une conversion du coût de production exergetique du vecteur hydrogène en coût massique. Le coût de production de l'électricité (voir tableau VI-7, §6.3.3.3) produit par cogénération est très élevé et constitue une barrière psychologique pour le décideur.
- La troisième et dernière étape répond à une problématique simple. La notion d'exergie est très peu diffusée au sein des décideurs. De plus, il est souhaitable de répercuter une bonne part des coûts de production globaux, sur celui de l'hydrogène afin de rendre l'électricité plus compétitive. Comme il est impossible de pouvoir délimiter clairement les composants dédiés à la production d'un vecteur donné, on procède à la fixation du coût de production de l'électricité pour en déduire celui de l'hydrogène ceci en conservant le coût de production global identique à celui calcul lors de la deuxième étape. Le coût de l'électricité se prête donc à des scénarios de marché pour celui-ci, qui permettent alors de calculer autant de valeurs pour l'hydrogène.

Pour illustrer et montrer tout l'intérêt de la méthodologie développée, la figure VI-21 représente l'ensemble des systèmes de conversion d'énergie étudiés dans ce chapitre. Ce graphe permet de visualiser clairement et rapidement l'intérêt économique d'un système de conversion d'énergie (hydrogène ou électricité) en fonction du coût de production de l'électricité au moment de la prise de décision.

Ainsi dans le cas d'une cogénération hydrogène-électricité, il est plus judicieux de produire de l'hydrogène lorsque le coût de l'électricité est faible, résultat en rapport avec le rendement bien plus faible des usines de production d'hydrogène que celui du cycle électrogène. Les sites 100% dédiés à la production d'hydrogène présentent un coût de production comparable dans la zone de coût de production du réseau électrique français, autour de 30 €/MWe. Le coût de production d'hydrogène devient même inférieur à celui d'un système de cogénération pour un coût de l'électricité inférieur à 0,02 €/kWh : cette différence provient du surcoût engendré par la présence d'une turbomachine. Cependant on note également que l'intérêt de sites de production 100% dédiés hydrogène diminue avec l'augmentation du prix de l'électricité : cette tendance peut être modifiée par le prix de vente de l'hydrogène. Les sites de cogénération seront de plus en plus intéressants du point de vue du coût hydrogène, mais le nombre de sites devra être multiplié pour pouvoir satisfaire la demande.

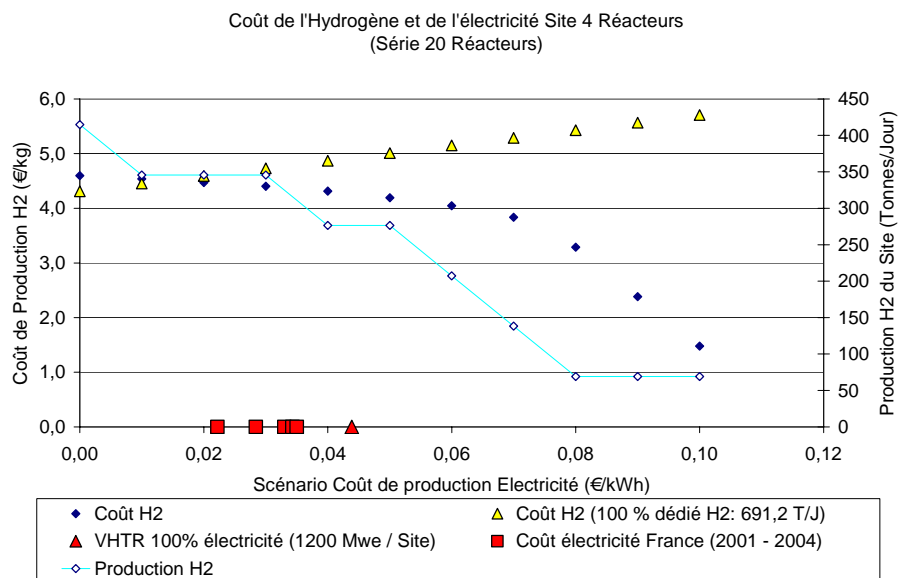


Figure VI-21 – Coût de production de l'hydrogène en fonction du marché de l'électricité

Conclusions générales et perspectives

Conclusion générales et perspectives

Face aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, telles que la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre, et face à l'épuisement annoncé des réserves d'énergies fossiles, dans un contexte sensible de tensions géopolitiques, des changements radicaux en matière de politique énergétique paraissent inévitables dans les prochaines décennies. Différents scénarii se profilent, parmi lesquels l'hydrogène est perçu comme un vecteur énergétique actuellement prometteur. Un des principaux enjeux technologiques d'une future économie de l'hydrogène est sa production à grande échelle en se passant d'énergies fossiles émettrices de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le nucléaire est particulièrement intéressant pour produire massivement de l'hydrogène par cycles thermochimiques ou par électrolyse haute température. Un des systèmes nucléaires sélectionnés est le réacteur à très haute température (950°C/1200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité, VHTR (*Very High Temperature Reactor*).

L'objectif principal de ces travaux, dans le cadre d'une collaboration entre le CEA de Cadarache et le LGC consistait à définir une méthodologie d'optimisation technico-économique de tels systèmes de cogénération électricité-hydrogène, en vue de proposer et d'identifier des stratégies prometteuses de développement. Cette étude se situe clairement sur le plan prospectif puisqu'une telle filière pourrait être opérationnelle à l'horizon 2030-2040. Elle a pour ambition d'établir une méthodologie générale par modélisation de ces systèmes qui puisse s'adapter à des variations de certains paramètres, notamment économiques, qui conditionnent l'obtention des résultats et orientent les stratégies. En fait, une étude figée sur une connaissance actuelle des scénarii économiques risquerait de compromettre la validité des résultats et rendrait caduque l'approche, dans une échelle de temps des quelques décennies à venir.

Parmi les procédés de production massive d'hydrogène à l'étude, on peut citer le cycle thermochimique Iode-Soufre et l'électrolyse à haute température. Seul le cycle thermochimique a été envisagé dans le cadre de ce travail, mais la méthodologie est suffisamment générique pour s'adapter à l'électrolyse.

Ces deux systèmes nécessitent un niveau élevé de température mais également un apport d'électricité. Compte tenu de la diversité des énergies exploitées (chaleur, électricité) et produites (hydrogène et électricité), la problématique visant à établir un critère de performance de la conversion d'énergie (de type rendement, par exemple) se pose.

C'est pourquoi une approche exergetique a été retenue dans le cadre de ces travaux, qui permet de comparer différentes formes d'énergie, sur le même plan d'équivalence thermodynamique. Les performances des cycles électrogènes, les boucles de distribution de chaleur et les systèmes de production d'hydrogène peuvent ainsi être comparés sur un strict pied d'égalité énergétique.

Une fois la faisabilité technique de ces systèmes établie, il reste à évaluer leur faisabilité économique.

On voit donc émerger une problématique bicritère impliquant un critère technique et un critère économique.

Face à cet objectif, les travaux présentés dans ce mémoire sont articulés autour de quatre axes de recherche principaux (voir figure 1) :

- Axe 1 (chapitre II) : développement d'algorithmes d'optimisation permettant de traiter des problèmes multicritères, et création de la bibliothèque d'algorithmes génétiques MULTIGEN.
- Axe 2 (chapitres III, IV) : choix d'un critère thermodynamique, basé sur la théorie de l'exergie, consistant en une minimisation des pertes/destructions exergétiques totales du système de cogénération.
- Axe 3 (chapitre V) : évaluation économique des systèmes en vue de la minimisation du coût total du site sur sa durée de vie. L'investissement des composants à optimiser est une partie sensible de l'étude.
- Axe 4 (chapitre VI) : développement d'une méthodologie d'optimisation et d'aide à la décision en trois étapes, et basée sur les deux critères précédemment décrits. Elle se veut généraliste et a été appliquée à trois systèmes de conversion de chaleur produite par un réacteur VHTR (voir figure 1) : la production d'électricité seule, la cogénération d'électricité et hydrogène, et enfin la seule production d'hydrogène.

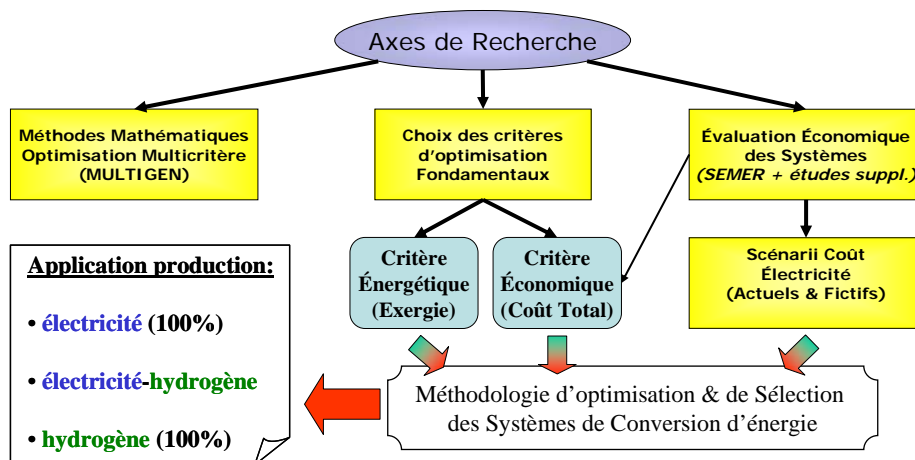


Figure 1 – Axes de recherche de la thèse

Nous détaillons ci-après les conclusions de ce mémoire et les perspectives de ce travail.

Développement d'algorithmes d'optimisation multicritère :

La bibliothèque d'algorithmes multicritères développée, baptisée MULTIGEN, intègre des algorithmes génétiques, reconnus pour être particulièrement adaptés à l'obtention directe de fronts de Pareto. Elle a été conçue de façon à modulaire et extensible : ainsi le code source est organisé en briques élémentaires (divers opérateurs de croisement et de mutation, gestion

des clones, ...), avec une standardisation totale des sous-programmes, ce qui permet leur utilisation aisée dans les codes actuellement implantés, mais également dans de futurs algorithmes. Plusieurs procédures composent la bibliothèque, s'adaptant selon le cas au caractère mono ou multicritère des problèmes, à leur type (optimisation de structures par exemple) et à la nature des variables (continues, entières ou binaires, mixtes).

Les principales innovations ont porté sur la fiabilisation des algorithmes implantés. Ainsi les mécanismes de NSGAI ont été analysés afin de traiter le cas de variables entières, binaires et continues et combler les failles pouvant provoquer un arrêt intempestif de l'optimisation. Un point clé consiste à la mise au point d'un critère d'arrêt efficace pour des problèmes multicritères, et basé sur la stagnation du front de Pareto. Un autre développement est basé sur le traitement des erreurs générées par le modèle : en effet, pour certaines valeurs de variables d'optimisation, il n'existe pas de solution techniquement faisable. Dans ce cas, l'individu correspondant est pénalisé au niveau des critères, pour éviter le blocage de l'algorithme. Les populations initiales peuvent être générées aléatoirement, mais également par un quadrillage régulier de l'espace de recherche.

Les algorithmes génétiques permettant de traiter des problèmes structurels sont particulièrement intéressants d'un point de vue conceptuel. Un premier algorithme est proposé dans la bibliothèque MULTIGEN, mais pour lequel il reste de nombreux développements à faire. Une perspective consisterait à coder un algorithme décomposant les sous-problèmes en autant de sous-problèmes, pour une structure donnée. Chacun de ces sous-problèmes sera traité séquentiellement, ou en parallèle par un algorithme génétique indépendant.

Les travaux présentés dans cette thèse ont également démontré l'intérêt des algorithmes génétiques dans la conception et l'optimisation des échangeurs de chaleur. Mais, les perspectives s'étendent bien sûr à d'autres types de composants dès lors qu'une recherche de compromis est nécessaire. L'utilisation de ces algorithmes n'est bien sûr pas limitée à la conception de procédés, ou de composants : ils peuvent être employés pour traiter des problèmes logistiques, de maintenance, de production, de sûreté, en exploitant les capacités de recherche combinatoire des algorithmes génétiques. Dans le cadre de la thématique de cette thèse, des applications dans la conception de l'implantation des usines de production d'hydrogène, en intégrant des contraintes de sûreté seraient une perspective intéressante.

Utilisation des outils d'aide à la décision

Les algorithmes génétiques multicritère sont destinés à mettre en œuvre la méthodologie en trois étapes, proposée dans ce mémoire et basée sur deux critères fondamentaux.

Le critère énergétique, consistant à minimiser les pertes/destructions exergétiques totales ne nécessite pas de connaissances particulières système : il suffit de pouvoir évaluer les pertes/destructions pour chaque composant sans considération de son échelle (composant, usine complète...) ce qui permet une démarche de comparaison unifiée. Cette démarche est tout à fait adaptée au principe de fonctionnement des simulateurs : un bilan exergétique individuel pour chaque composant permet de remonter automatiquement au critère

d'optimisation final en ajoutant les pertes de l'ensemble des composants. On dispose donc d'un critère unique, dont le calcul est indépendant de la structure du système de conversion d'énergie, et capable de tenir compte de plusieurs formes d'énergie (mécanique, chaleur, électricité).

Le critère économique est basé sur la minimisation du coût total du site de production, sur sa durée de vie. Il présente trois composantes principales : l'investissement, les coûts d'exploitation et celui du combustible nucléaire. L'investissement fait appel au développement de fonctions de coûts adaptées aux technologies et aux conditions de fonctionnement. Un soin particulier a été apporté pour évaluer l'impact de la pression de fonctionnement sur le coût des composants : les résultats mettent en évidence qu'une augmentation de la pression permet un gain sur le coût de production de l'électricité. La pression, en tant que variable d'optimisation est donc appelée à jouer un rôle important, mais sa mise en œuvre reste complexe au niveau des fonctions de coût.

L'ajout des coûts d'exploitation et du combustible, grâce à SEMER permet l'évaluation du coût de production de l'électricité et de l'hydrogène. Mais cette approche doit être complétée par des scénarii sur le marché de l'énergie : la méthodologie exposée permet déjà de prendre en compte le marché de l'électricité.

L'optimisation technico économique et l'évaluation du coût de production nécessitent trois phases :

- **Phase 1** : optimisation bi-critère par minimisation des pertes/destructions exergétiques sur le système et minimisation du coût total sur la durée de vie du site (modèle SEMER) puis calcul d'un coût de production exergétique (en €/kWh) de l'hydrogène et de l'électricité (identique pour les deux).
- **Phase 2** : calcul du coût de production de l'hydrogène en €/kg (équivalent pouvoir exergétique de H₂) en utilisant l'équation 5.
- **Phase 3** : calcul du coût de production de l'hydrogène en €/kg, par fixation du prix de vente au réseau de l'électricité. L'objectif est de répartir les coûts de production entre les deux énergies produites.

Les résultats principaux sont représentés sur la figure 2 :

Les sites 100% dédiés à la production d'hydrogène présentent un coût de production comparable dans la zone de coût de production du réseau électrique français. De plus, la production d'hydrogène (691,2 T/J de H₂) est plus élevée que les systèmes de cogénération. Le coût de production d'hydrogène devient inférieur à un système de cogénération pour un coût de l'électricité en-dessous de 0,02 €/kWh : cette différence provient du surcoût engendré par la présence d'une turbomachine. Cependant, on note également que l'intérêt de sites de production 100% dédié hydrogène diminue avec l'augmentation du prix de l'électricité. Les sites de cogénération seront de plus en plus intéressants du point de vue du coût hydrogène, mais le nombre de sites devra être multiplié, pour espérer un effet de série diminuant les coûts de production.

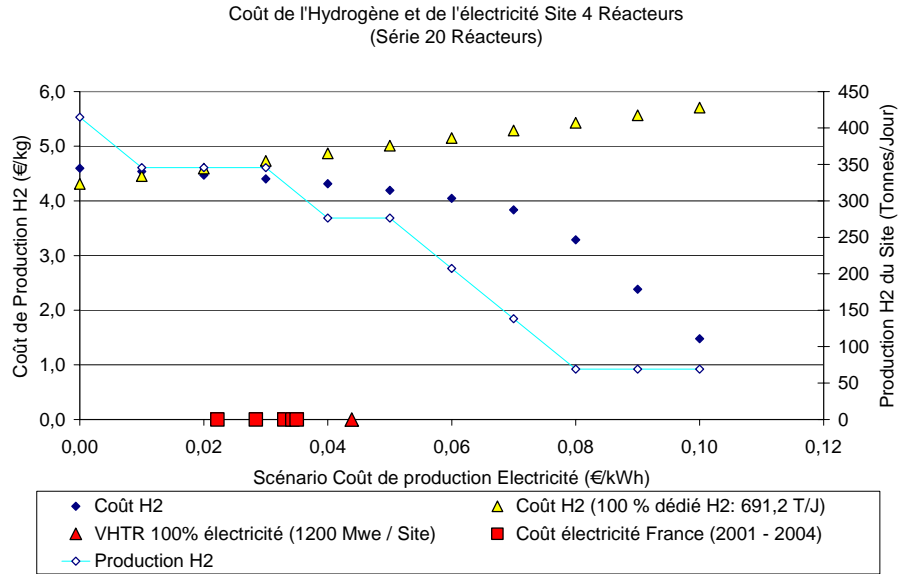


Figure 2 – Coût de production de l'hydrogène en fonction du marché de l'électricité

Cette méthodologie pourra également s'appliquer à la production d'hydrogène par électrolyse à haute température. Le procédé actuel utilise environ un tiers de chaleur et deux tiers d'électricité pour produire de l'hydrogène. De plus, le rendement attendu est supérieur à celui du cycle Iode-Soufre. In fine, on disposera d'une étude comparative entre deux procédés de production d'hydrogène. D'autres cycles de production d'hydrogène existent, notamment les cycles hybrides pourront être envisagés. Un de ces cycles reprend le principe du cycle Iode-Soufre, mais la réaction de décomposition de l'acide sulfurique est réalisée par la voie électrochimique.

Le problème de couplage de l'ensemble des outils à disposition a été exploré, dans le cadre d'une approche innovante consistant à utiliser les résultats des simulations des systèmes, comme informations pour permettre le prédimensionnement des composants.

Ce prédimensionnement permet ensuite de réaliser une estimation des coûts des composants puis d'évaluer le coût de production d'un site nucléaire. Cette approche a été mise en œuvre sur un cas d'une turbomachine, à l'aide d'un modèle économique simple. L'objectif étant de prédimensionner le récupérateur de chaleur, les résultats permettent de réduire sa surface d'échange, donc son coût. Cette procédure est complexe à mettre en œuvre car elle nécessite de disposer de l'ensemble des modules de prédimensionnement et des fonctions de coût adaptées. Une bonne partie de ces fonctions a fait d'objet d'études au cours de cette thèse, notamment pour les turbines et compresseurs axiaux.

Une prochaine étape consisterait à prendre en compte le marché de l'hydrogène. Actuellement l'hydrogène est considéré comme un produit principalement à destination de l'industrie, l'explosion de la demande et les fortes tensions sur l'offre pourraient rendre à l'avenir la production d'hydrogène plus rentable qu'elle ne l'est actuellement.

On peut espérer dans ce contexte que les systèmes peu favorisés, à l'heure actuelle par la méthode de sélection proposée dans ce mémoire, pourront le devenir.

Cette approche est rendue difficile car les perspectives sont très éloignées dans le temps : les réacteurs de génération IV ne seront disponibles qu'à partir de 2030 et le marché de l'hydrogène lui-même ne démarrera que très progressivement. L'évaluation économique des systèmes eux-mêmes est d'ores et déjà complexe et la projection économique vers des échéances si éloignées est problématique.

Néanmoins, nous espérons avoir contribué au développement d'une méthodologie qui pourra prendre en compte les évolutions des systèmes de production d'hydrogène et enrichir ainsi la base de connaissances des décideurs.

NOMENCLATURE GENERALE

Chapitre I

COPERNIC : logiciel CEA de prédimensionnement de composants

CYCLOP : logiciel CEA de résolution de cycles thermodynamiques

ANTARES : AREVA New Technology based on Advanced Gas cooled Reactor for Energy Supply)

EHT: Électrolyse à Haute Température

GT-MHR : Gas Turbine Modular High temperature Reactor

SEMER: logiciel d'estimation de coût des installation nucléaires

VHTR : Very High Temperature Reactor

PW : Valeur actuelle du procédé

I : Investissement

Q : Flux financiers vente produit – achat matière première

S : Fond de réserve

k : Taux d'actualisation

n : Années d'activité

η_{Global} : Rendement global (%)

W_e : Puissance électrique produite

$W_{PCS H_2}$: Puissance équivalent Pouvoir Calorifique Supérieur de l'hydrogène

W_{th} : Puissance thermique

Chapitre II

AG : Algorithme Génétique

COPERNIC : logiciel CEA de prédimensionnement de composants

CYCLOP: logiciel de simulation des cycles thermodynamiques

DTN : Département des Technologies Nucléaires

GT-MHR : Gas Turbine Modular High temperature Reactor

IHX : Intermediate Heat eXchanger

LBE: Liens entre variables Binaires et Entières

LBC: Liens entre variables Binaires et Continues

LEC: Liens entre variables Entières et Continues

MIB MOGA : Mixed Integer Binary Multi Objective Genetic Algorithm

MOGA: Multi Objective Genetic Algorithm

MULTIGEN: bibliothèque d'algorithmes génétiques sous Excel

NPGA : Niched Pareto Genetic Algorithm

NSGA : Non Sorted Genetic Algorithm

SBX: Simulated Binary Crossover

SEMER : logiciel d'estimation du coût d'une installation nucléaire

SPEA : Strength Pareto Evolutionary Algorithm

VEGA : Vector Evaluated Genetic Algorithm

VHTR: Very High Temperature Reactor

Ex_{perdue} : Pertes d'exergie du système (MW)

Ex_{perdue}^i : Pertes d'exergie pour un composant i du système (MW)

q_i : Débit massique (kg/s)

h_i : Enthalpie massique (kJ/kg)

T_0 : Température atmosphérique (K)

s_i : Entropie massique (kJ/kg/K)

CT : Coût total du système sur sa durée de vie (M€)

T_i : Durée d'investissement (an)

T_e : Durée d'activité (an)

t : Année d'évaluation

$(C_{iTOR})_t$: Coût de l'investissement total (M€an)

$(C_{Op})_t$: Coût de fonctionnement total (M€an)

$(C_{Maint})_t$: Coût de maintenance (M€an)

I : taux d'actualisation (%)

rP : taux de détente ou de compression

S_{Ech} : Surface d'échange (m^2)

$\Delta\theta_{ml}$: Température moyenne logarithmique ($^{\circ}C$)

W_{Ech} : Puissance de l'échangeur (W)

U : Coefficient de transfert global de l'échangeur ($W/m^2/^{\circ}C$)

y : Taux de partage d'un courant

ε : efficacité d'un échangeur thermique

Chapitre III

dU : variation de l'énergie interne

dS : variation de l'entropie des corps

dV : variation de volume du système

T : température

P : pression

n_{sc} : Nombre de sources de chaleur

n_e : Nombre de courants entrants dans le système

n_s : Nombre de courants sortant du système

m_k : Débit massique du courant k (kg/s).

h_k : Enthalpie du courant k (J/kg).

s_k : Entropie du courant k (J/kg/K).

$W_{m\acute{e}c\acute{a}n\acute{i}q\acute{u}e}^{Pr\acute{o}d / Fourni}$: Source ou puits d'énergie mécanique (W).

$W_{\acute{e}l\acute{e}c\acute{t}r\acute{i}q\acute{u}e}^{Pr\acute{o}d / Fourni}$: Source ou puits d'énergie électrique (W).

$Q_{thermique}^i$: Source d'énergie thermique j (W).

T_i : Niveau de température du réservoir thermique fournissant / recevant $Q_{thermique}^i$ (K).

T_0 : Température du réservoir thermique de référence (P_0, T_0) (K).

T_S : Température moyenne du système (K) entre l'entrée et la sortie du courant matière

\dot{S}_{Irr}^{Int} : Flux entropique d'irréversibilité interne (J/s/K).

$T_{réf}$: Température de référence du potentiel exergétique nul.

dQ_{Pertes} : Puissance perdue à travers les parois de l'échangeur (W)

T_F : Température du fluide (K)

$T_P^{M\acute{e}t\acute{a}l}$: Température à l'interface entre la paroi métallique et l'isolant (K)

$T_P^{Isolant}$: Température à l'interface entre l'isolant et l'atmosphère (K)

$I_{Irr}^{M\acute{e}t\acute{a}l}$: Irréversibilité créée lors du transfert à travers la paroi métallique (W/K)

$I_{Irr}^{Isolant}$: Irréversibilité créée lors du transfert à travers la paroi isolante (W/K)

T_0 : Température de référence de l'atmosphère (K)

T_i : Température d'entrée de l'élément différentiel i (K)

P_i : Pression d'entrée de l'élément différentiel i (bar)

h_i : Enthalpie massique du courant (J/kg)

dQ_i : Puissance thermique cédée/reçue par l'élément différentiel i (W)

ΔP_i : Perte de charge sur l'élément différentiel i (bar)

$mater$: formule du constituant

H_{TcP}^6 : Calcul de l'enthalpie massique en fonction de T et de P (J/kg)

Tc_{HP}^6 : Calcul de la température en fonction de l'enthalpie massique et de P

η_{Ex} : Rendement exergetique du système

$Ex_{Produit}$: Puissance exergetique produite par le système

Ex_{fourni} : Puissance exergetique fournie au système

\dot{N} : Numérateur représentant l'exergie produite

\dot{D} : Dénominateur représentant l'exergie fournie au système

\dot{L} : Pertes exergetiques du système

ψ : Pertes exergetiques relatives

Δh_0 : Pouvoir énergétique de B (J/mol)

H_{MO} : Enthalpie du mélange initial M , dans les conditions de référence P_0 et T_0 (en général, valeurs standards $P_0 = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$ et $T_0 = 25^\circ\text{C}$) (J)

H_{Rc0} : Enthalpie des produit finaux de combustion Rc , résultant d'une combustion complète, dans les mêmes conditions de référence (J)

M_B : Quantité de combustible B (mol)

$h_v(T_0)$: Enthalpie de la vapeur d'eau ramenée à la masse molaire de combustible B

$h_l(T_0, P_0)$: Enthalpie de l'eau liquide ramenée à la masse molaire de combustible B

$q_{vap}^{H_2O}(T_0, P_0)$: Enthalpie molaire de vaporisation de l'eau

M_{H_2O} : Masse molaire de l'eau

M_B : Masse molaire du combustible B

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur (J/mol)

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur (J/mol)

Chapitre IV

⁶ Fonction d'état de COPERNIC

T_0 : Température atmosphérique (K)

\dot{S}_{Irr} : Puissance perdue par irréversibilité (W)

$\dot{S}_{Irr}^{elec/méca}$: Puissance électrique/mécanique perdue par irréversibilité (W)

\dot{S}_{Irr}^{Th} : Puissance thermique perdue par irréversibilité (W)

T_k : Température k (K)

T_S : Température moyenne du système étudié (K)

\dot{q}_i : Débit massique (kg/s)

h : Enthalpie massique (J/kg)

s : Entropie massique (J/kg/K)

(T_{In}^i, P_{In}^i) : Température (K) et pression (Bar) du courant i entrant

(T_{Out}^j, P_{Out}^j) : Température (K) et pression (Bar) du courant j sortant

W_{Rec}^k : Puissance k reçue (W)

W_{Trans}^l : Puissance l transmise (W)

W_{Pertes} : Puissance perdue (W)

W_{Int} : Puissance interne du système (W)

$\delta_{Rec}^k(T_k)$: Facteur de Carnot pour une source de chaleur k, à la température moyenne T_k , reçue par un système

$\delta_{Trans}(T_S)$: Facteur de Carnot du système, à sa température moyenne T_S , associé aux flux de chaleurs transférés vers un autre système

$\delta_{Pertes}(T_S)$: Facteur de Carnot du système, à sa température moyenne T_S , associé aux flux de chaleurs perdu par le système

Ex_{perdue}^i : Exergie totale perdue par le système (W)

VHTR : Very High Temperature Reactor, réacteur nucléaire à très haute température

GT-MHR : Gas Turbine Modular High temperature Reactor, turbocompresseur à gaz (hélium) de réacteur nucléaire à haute température

Precooler : pré refroidisseur

Intercooler : refroidisseur intermédiaire

BP : Basse Pression

HP : Haute Pression

GV : Générateur de Vapeur

DTN : Département des Technologies Nucléaires

DER : Département d'Études des Réacteurs

IHX : échangeur de chaleur intermédiaire, Intermediate Heat eXchanger

PCS : Pouvoir calorifique supérieur (J/mol)

PCI : Pouvoir calorifique inférieur (J/mol)

Chapitre V

$W_{\text{Compresseur}}$: puissance compresseur (MW)

W_{elec} : puissance électrique (MW)

W_{Th} : puissance thermique (MW)

$W_{\text{Soufflante}}$: puissance de la soufflante (MW)

P_e : pression d'entrée (bar)

P_s : pression de sortie (bar)

P_{Max} : pression maximale (bar)

$\Delta\theta_{ml}$: température moyenne logarithmique (°C)

rP : taux de compression

η_{IS} : rendement isentropique

Chapitre VI

CT_{Site} : Coût total site sur la durée de vie D (M€)

$Ca_{\text{Combustible}}(t)$: Coût annuel du combustible à la date t (M€)

$Ca_{\text{Exploitation}}(t)$: Coût annuel d'exploitation à la date t (M€)

$Ca_{\text{Investis}}(t)$: Coût annuel investis à la date t (M€)

$Pa(t)$: Production annuelle d'énergie d'un site à la date t (MW)

$C_{\text{Prod}}(\text{€} / kWh)$: Coût de production de l'énergie (€/kWh)

i : taux d'actualisation

D : durée d'exploitation (ans)

t : date d'exploitation

N_{Tranches} : Nombre de tranches par site (4 dans les scénarios étudiés)

$\tau_{\text{Disponibilité}}$: Taux de disponibilité d'un réacteur (77,2% dans les scénarios étudiés)

D_{appel} : Durée d'appel, nombre d'heures d'exploitation par an (8760 h/an)

W_e : Puissance électrique produite (MW)

$\dot{n}_{H_2/Tranche}$: Production d'hydrogène par tranche (mol/s)

$P_{Ex}(H_2)$: pouvoir exergétique de l'hydrogène (MJ/mol)

y : Taux de partage d'un courant

ε : efficacité d'un échangeur thermique

BIBLIOGRAPHE GENERALE

A

- [ACE96] Acevedo J., Pistikopoulos E. N., *A Parametric MINLP Algorithm for Process Synthesis Problems under Uncertainty*. Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35, 147-158.
- [ALP00] The standards of the brazed aluminium plate-fin heat exchanger manufacturers' association (ALPEMA) - Second Edition. The Brazed Aluminium Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturers' Association, 2000.
- [ARN04] Arnaud G., Dumas M., *Manuel d'utilisation de Vizir*. Document interne CEA, 2004.
- [ATM03] Atmaniou L., Dietz A., Azzaro-Pantel C., Zarate P., Domenech S., Le Lann J.M., *A multiobjective genetic algorithm optimization framework for batch plant design*. Computer Aided Chemical Engineering, 2003, 15, 400-405.
- [AZZ98] Azaro-Pantel C., Bernal Haro L. Baudet P., Domenech S., Pibouleau L., *A two-stage methodology for short-term batch plant scheduling: Discrete event simulation and genetic algorithm*. Computer and Chemical Engineering, 1998, 22, 1461-1482.
- [AUJ06] Aujollet P., Paramètres de fonctionnement à puissance nominale du circuit de couplage d'un réacteur nucléaire à très haute température a une usine de production d'hydrogène par cycle Iode-Soufre, Document interne CEA, 2006.

B

- [BAC97] Bäck T., Hammel U., Schwefel H.P., *Evolutionary computation: comments on the history and current state*. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 1997, 1, 3-17.
- [BAR03] Barbier D. et al, *Evaluation du concept de réacteur PBMR*, Document interne CEA, 2005.
- [BAR06] Barbier D., *VHTR 100% Calogène Evaluation simplifiée du coût de production de la chaleur*, Document interne CEA, 2006.
- [BAU99] Baudet P., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., Un couplage entre un algorithme génétique et un modèle de simulation pour l'ordonancement à court terme d'un atelier discontinu de chimie fine. RAIRO RO, 1999, 33, 3, 299-338.
- [BER02] Bernal-Haro L., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Multiobjective batch plant design: a two-stage methodology – Part II: Development of a genetic algorithm and result analysis*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41, 5743-5758.
- [BEJ88] Bejan A., *Advanced Engineering Thermodynamics*, 1984, Wiley, New York.
- [BIE06] M. V. Biezma, J. R. San Christobal, *Investment criteria for the selection of cogeneration plants – a state of arts review*. Applied Thermal Engineering, 2006, 26, 583-588.
- [BLA06] Blanc M., Allegre P., *Etude d'un concept d'échangeur intermédiaire pour le RNR-G 2400 MWTB*, Document interne CEA, 2006.
- [BOR84] Borel L., *Thermodynamique et Energétique*, Presses Polytechniques romandes, 1984, Lausanne.
- [B2342] Bontemps A et al, *Echangeurs de chaleur: Dimensionnement thermique*. Traité Génie Energétique, Technique de l'Ingénieur, B 2 342.

C

- [CHA01] A. Chauvel, G. Fournier, C. Rainbault, *Manuel d'évaluation économique des procédés*, Editions Technip, Paris, 2001.

D

- [DEB95] Deb K., Agrawal S., *Simulated binary crossover for continuous search space*. Complex systems, 1995, 9, 115-148.
- [DEB96] Deb K., Goyal M., *A combined adaptative search (Gene AS) for engineering design*. Computer science and informatics, 1996, 26, 30-45.
- [DEB02] Deb K., *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. IEEE Transaction On Evolutionary Computation, 2002, 6, 182-197.
- [DED03] Dedieu S., Pibouleau L., Azzaro-Pantel C., Domenech S., *Design and Retrofit of Multiobjective Batch Plants via a Multicriteria Genetic Algorithm*. Computers and Chemical Engineering Journal, 2003, 27, 1723-1740.
- [DID03] *Coût de référence de la production électrique*, DIDEME, Décembre 1996
- [DIE04] Dietz A., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Integrating environmental impact minimization into batch plant design: Application to protein production*. Computer Aided Chemical Engineering, 2004, 18, 1033-1103.
- [DIE05] Dietz A., Schirlin M., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Multicriteria optimization of batch plant design and retrofit: application to an industrial fine chemistry case study*. Chemical Engineering Transaction, 2005, 6, 215-220.

- [DIE06] Dietz A., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Multiobjective optimization for multiproduct batch plant design under economic and environmental considerations*. Computers and Chemical Engineering Journal, 2006, 30, 599-613.
- [DIE07] Dietz A., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Optimal design of batch plants under economic and ecological considerations: Application to a biochemical plant*. Mathematical and Computer Modelling, 2007, 46, 109-123.
- [DUM02] Dumas M., *Optimisation multicritère par algorithmes génétiques*. Document interne CEA, 2002.
- [DUM03] Dumas M., Gautier F., *Optimisation multicritère stochastique par algorithmes génétiques*. Document interne CEA, 2003.
- F**
- [FLA05] *Projet Flamanville 3 – tête de série EPR*, Dossier du Maître d’ouvrage pour le Débat Public 2005-2006, DIDEME, Décembre 1996
- [FON98] Fonseca, C. M., Fleming P. J., *Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithm – Part I: A unified Formulation*. IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1998, 28, 26-37.
- [FON93] Fonseca C., Fleming P., *Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalisation*. Proc. Of the 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1993, 416-423.
- [FOU05] Foussier P., *Evaluation technico-économique du PCS*. Rapport d’étude Société 3f Document interne CEA
- [FOU06] Foussier P., *From Product Description to Cost : A practical Approach*. Volume 1 (the parametric approach) & volume 2 (building a specific model), Springer (éd), 2006
- G**
- [GOL89] Golberg D.E., *Genetics algorithm in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company Inc., MA, 1989.
- [GOM08] Gomez A., *Optimisation technico-économique multiobjectif de systèmes de conversion d’énergie : Cogénération électricité-hydrogène à partir d’un réacteur de IV^{ème} génération*. Note Technique CEA, 2008.
- [GOL06] Goldstein S., *Approche exergétique des procédés de dissociation de l’eau*, Document interne CEA, 2006.
- [GOU89] Gouy G., *Sur l’énergie utilisable*, Journal de Physique, 1889, 8 (2^{ème} édition), 501.
- [GA96] *Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) Conceptual Design Description Report*, General Atomics, GA Project N°7658, San Diego, July 1996
- [GIL06] Gilardi T., Gomez A., Rodriguez G., *Estimation des coûts d’investissement d’une usine de production d’hydrogène par le cycle thermochimique iode/soufre*, Document interne CEA.
- [GIL07] Gilardi T., Rodriguez G., *Evaluation prospective du coût d’investissement d’une usine de production d’hydrogène par le cycle thermochimique iode/soufre*, Document interne CEA, 2006.
- [GOM07] Gomez A., *Recherches sur un critère d’optimisation énergétique adapté à l’optimisation technico-économique des systèmes de cogénération d’électricité et d’hydrogène de IV^{ème} génération*, Document interne CEA, 2007.
- H**
- [HAU04] Haubensack D., Thevenot C., Dumaz P., *The COPERNIC/CYCLOP Computer Tool: Pre-Conceptual Design of Generation 4 Nuclear Systems*, Proceedings of the Conference on High Temperature Reactors, Beijing, China, September 22 – 24 2004, International Atomic Agency, Vienna (Austria), HTR-2004, 1-11.
- [HOL75] Holland J., *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1975.
- [HOR94] Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D., *A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*. Proc. of the 1st IEEE conference on Evolutionary Computation, 1994, 1, 82-87.
- [HAU05] Haubensack D., *Etude comparative des cycles de conversion d’énergie envisageables pour les réacteurs électrogènes à caloporteur gaz de type VHTR*, Document interne CEA, 2005.
- [HAU04] Haubensack D., Thevenot C., Dumaz P., *The COPERNIC/CYCLOP Computer Tool: Pre-Conceptual Design of Generation 4 Nuclear Systems*, Proceedings of the Conference on

High Temperature Reactors, Beijing, China, September 22 – 24 2004, International Atomic Agency, Vienna (Austria), HTR-2004, 1-11.

J

[JEN03] Jensen M. T., *Reducing the Run-Time Complexity of Multiobjective Eas: The NSGA II and Other Algorithms*. IEEE Transaction On Evolutionary Computation, 2003, 7, 503-515.

K

[KOS87] Kocis G. R., Grossmann I. E., *Relaxation Strategy for the Structural Optimization of Process Flowsheets*. Ind. Eng. Chem. Res., 1987, 26, 1869-1880.

L

[LAQ97] Laquerbe C., Foquet P., Domenech S., Pibouleau L., *Conception de séquences de séparation par un algorithme génétique*. RAIRO RO, 1997, 31, 4, 375-398.

[LAQ01] Laquerbe C., Laborde J.C., Soares S., Floquet P., Pibouleau L., Domenech S., *Synthesis of RTD Models via stochastic procedures: Simulated Annealing and Genetic Algorithm*. Computer and Chemical Engineering, 2001, 25, 1169-1184.

[LEY05] Leybros J., *Cycle Iode-Soufre de thermoconversion de l'eau. Etude d'un schéma usine*, Document interne CEA, 2005.

[LIO07] Lior N., Zhang N., *Energy, Exergy, and the Second Law performance criteria*, Energy, 2007, 32, 281-296.

[LIN06] *Aluminium Plate-Fin Heat Exchanger*. Bryan Research & Engineering Inc.-Technical Papers, Bryan, Texas (USA), 2006.

[LUN06] Lunsford K. M., *Advantages of Brazed Heat Exchangers in the Gas Processing Industry*. Bryan Research & Engineering Inc.-Technical Papers, Bryan, Texas (USA), 2006.

M

[MAR02] I.O. Marrero, A.M. Lefsafer, A. Razani, K.J. Kim, *Second law analysis and optimization of a combined triple power cycle*. Energy Conversion and Management, 2002, 43, 557-573.

[MAN06] Mansilla C., Dumas M., F. Werkoff, *A techno-economic optimization of the power conversion system of a very high temperature reactor*, Proceedings of ICONE14 International Conference on Nuclear Engineering, July 17-20, Miami, Florida, USA.

[MON04] Montastruc L., Azzaro-Pantel C., Biscans B., Davin A., Pibouleau L., Domenech S., *Use of genetic algorithms and gradient based optimization techniques for calcium phosphate precipitation*. Chemical Engineering and Processing, 2004, 43, 1289-1298.

[MOR82] Moran M. J., *Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use*, 1982, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[MAN05] Mansilla C., Arnaud G., Dumas M., Raepseat X., F. Werkoff, *Optimisation technico-économique du circuit secondaire d'un HTR entièrement dédié à la production d'électricité*, Document interne CEA, 2005.

[MAC08a] *Reference Tables – Machinability of Metals*. Engineer's Handbook, 2006, www.engineershandbook.com

[MAC08b] *Steel-Aluminium-Magnesium Machinability Index Chart*. Engineers Edge, 2006, www.engineersedge.com

[MAS05] Massart S., Graillat G., *La place de l'EPR dans la strategie EDF*, Contrôle, n°164, Autorité de sûreté nucléaire, Mai 2005.

N

[NIS03] Nisan S., Rouyer J. L., Marcetteau P., Duflo D., *SEMER: a simple code for the economic evaluation of nuclear and fossil energy-based power production systems*. Nuclear Engineering and Design, 2003, 221, 301-313.

O

[OKBM98] *International GT-MHR project - Conceptual Design Report*, Experimental Design Bureau of Machine Building (OKBM), Int. GT-MHR 100025, 1998.

[OCDE05] Coût prévisionnels de la production électrique, OCDE/AEN/AIEA, 2005.

[OBS07] *Prix du gaz et de l'électricité en Europe au 1^{er} Janvier 2007*, Energie & Matières Premières, Observatoire de l'Energie, Août 2005.

P

- [PAP98] Papalexandri K. P., Dimkou I., *A Parametric Mixed-Integer Optimization Algorithm for Multiobjective Engineering Problems Involving Discrete Decisions*. Ind. Eng. Chem. Res., 1998, 37, 1866-1882.
- [PAR96] Pareto V., *Cours d'économie Politique*. Rouge, Lausannes, Suisse, 1896.
- [PER97] Perrin A., Mandrille A., Oumoun M., Fonteix C., Marc I., *Optimisation globale par strategie d'évolution, technique utilisant la génétique des individus diploïdes*. Recherche Opérationnelle/Operations Research, 1997, 31, 161-201.
- [PON07a] Ponsich A., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *MINLP optimization strategies for batch plant design*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46, 854-863.
- [PON07b] Ponsich A., Touche I., Azzaro-Pantel C., Dayde M., Pibouleau L., Domenech S., *Performance analysis of optimisation methods in PSE applications. Mathematical programming vs. grid-based multi-parametric genetic algorithm*. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85, 815-824.
- [PON08] Ponsich A., Azzaro-Pantel C., Pibouleau L., Domenech S., *Constraint handling strategies in genetic algorithms – Application to optimal batch plant design*. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47, 420-434.
- [PET03] Peters M.S., Timmerhaus K.D., West R.E., *Plant design and economics for chemical engineers*, Elisabeth A. Jones, 2003.
- [PAR04] Parker N., *Using Natural Gas Transmission Pipeline Cost to Estimate Hydrogen Pipeline Cost*, UCD-ITS-RR-04-35, Institute of Transportation Studies University of California, 2003.
- [PRA03] Pra F., *Dimensionnement des refroidisseurs Eau Hélium pour le cycle direct*, Document interne CEA, 2003.
- [PET03] Peters, Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th Edition, Mc Graw Hill Inc., N. Y., 2003.

R

- [ROO03] Roosen P., Uhlenbruck S., Lucas K., *Pareto optimization of a combined cycle power system as a decision support tool for trading off investment vs. operating costs*. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42, 553-560.

S

- [SAE05] Saez M., Ruby J.-P., Tenchine D., Pialla D., Germain T., *Prédimensionnement de la boucle système en air SALSA*, Document interne CEA, 2005.
- [SCH85] Schaffer J., *Multi-objective optimisation with vector evaluated genetic algorithms*. Proc. Int. Conf. on Genetic Algorithms and their applications, 1985, 93-100.
- [SHO06] Shopova E. G., Vaklieva-Bancheva, N. G., *BASIC – A genetic algorithm for engineering problems solution*. Computer and Chemical Engineering, 2006, 30, 1293-1309.
- [SRI95] Srivinas N., Deb K., *Multiobjective function optimisation using non-dominated sorting genetic algorithms*. Evolutionary Computation, 1995, 2, 221-248.
- [SCO03] Scott D. S., *Exergy*, International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28, 369-375.
- [SCH74] Schlenker H. V., *Cost functions for HTR direct cycle components*. Atomkernenergie, 1974, 22, 226-235.

T

- [TAN95] Tanaka M., *GA-based decision support system for multicriteria optimization*. Proceedings IEEE International Conference of Systems, Man and Cybernetics-2, 1995, 1556-1561.

W

- [WER05] Werkoff F., *Eléments d'évaluation de procédés de production d'hydrogène*, Document interne CEA, 2005.

Z

- [ZIT99] Zitzler E., Thiele L., *Multiobjective evolutionary algorithm: a comparative case study and the strength Pareto approach*. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 1999, 3, 4, 257-271.

ANNEXES

Annexes chapitre II

Croisement et mutation pour les variables continues

Le croisement SBX (Simulated Binary Crossover) permet de viser deux individus enfants à partir de deux individus parents. La particularité du croisement SBX repose sur le calcul des facteurs de pondération pour chaque locus parent (locus = localisation précise d'un gène particulier sur un chromosome), définis par une distribution polynômiale de probabilité d'ordre n .

La procédure de croisement SBX (Simulated Binary crossover) qui crée des solutions enfants $y^{(1)}$ et $y^{(2)}$ à partir de deux parents $x^{(1)}$ et $x^{(2)}$, est la suivante :

1. tirage d'un nombre aléatoire u entre 0 et 1.

2. calcul du paramètre $\bar{\beta}$ en utilisant une loi de distribution de probabilité polynomiale [DEB95] dont l'expression est la suivante :

$$\bar{\beta} = \begin{cases} (\alpha \times u)^{1/(\eta_c+1)}, & \text{si } u \leq 1/\alpha \\ \left(\frac{1}{2-\alpha \times u}\right)^{1/(\eta_c+1)}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A II-1})$$

L'indice de distribution η_c pour le croisement SBX ne peut pas prendre de valeurs négatives. Une faible valeur de η_c revient à créer des enfants pouvant être plus éloignés des parents, alors qu'une faible valeur donnera des enfants plus proches de leurs parents.

Le coefficient α est calculé de la façon suivante :

$$\alpha = 2 - \beta^{-(\eta_c+1)} \quad (\text{A II-2})$$

$$\beta = 1 + \frac{2}{|x^{(2)} - x^{(1)}|} \times \min\left[|x^{(1)} - x^l|, |x^u - x^{(2)}|\right] \quad (\text{A II-3})$$

3. Les enfants calculés sont les suivants :

$$y^{(1)} = 0,5 \times \left[(x^{(1)} + x^{(2)}) - \bar{\beta} \times |x^{(2)} - x^{(1)}| \right] \quad (\text{A II-4})$$

$$y^{(2)} = 0,5 \times \left[(x^{(1)} + x^{(2)}) + \bar{\beta} \times |x^{(2)} - x^{(1)}| \right] \quad (\text{A II-5})$$

On suppose, dans l'équation II-9 que $x^{(1)} < x^{(2)}$. Une simple modification de l'équation permet de considérer le cas $x^{(1)} > x^{(2)}$. Cette procédure donne une probabilité de croisement nulle si les enfants sont créés en dehors du domaine défini par les variables $[x^l, x^u]$.

Si plusieurs variables sont traitées, chaque variable est choisie aléatoirement, avec une probabilité uniforme de 50%, la procédure ci-dessus est appliquée à toutes les variables successivement.

La procédure de mutation principale utilisée dans l'algorithme NSGA II [DEB02], et a été proposée par Deb et Goyal [DEB96]. Elle est basée sur une perturbation du gène initial, suivant une distribution de probabilité polynomiale d'ordre n et dont la moyenne est égale à la valeur du gène initial. La procédure ci-dessous est utilisée pour les variables dont les bornes minimales et maximales sont connues :

1. génération d'un nombre aléatoire u entre 0 et 1.

2. calcul du paramètre $\bar{\delta}$ suivant :

$$\bar{\delta} = \begin{cases} \left[2u + (1-2u)(1-\delta)^{\eta_m+1} \right]^{1/(\eta_m+1)} - 1 & , \text{si } u \leq 0,5 \\ 1 - \left[2 \times (1-u) + 2 \times (u-0,5)(1-\delta)^{\eta_m+1} \right]^{1/(\eta_m+1)} & , \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A II-6})$$

Avec δ exprimé par :

$$\delta = \text{Min} \left[\frac{x - x^l}{x^u - x^l}, \frac{x^u - x}{x^u - x^l} \right] \quad (\text{A II-7})$$

η_m est l'indice de distribution pour la mutation et prend des valeurs non négatives.

3. Calcul de la mutation de l'enfant.

$$y = x + \bar{\delta} \Delta_{\max} \quad (\text{A II-8})$$

En utilisant les équations précédentes, il est possible d'estimer la valeur de la perturbation normalisée $((y-x)/(x^u-x^l))$ de la solution mutée, coté positif ou négatif séparément. On observe que cette valeur est de l'ordre de grandeur de $1/\eta_m$. Ainsi, pour obtenir une perturbation des solutions de l'ordre de 1%, η_m doit être proche de 100.

Annexes chapitre III

Tableau A III-1 - Courant d'alimentation en eau du cycle Iode - Soufre

Débit total (mol/s)	100
Température (°C)	20
Pression (Bar)	1
Enthalpie (J/mol)	-44365,36
Entropie (J/mol/K)	5,33
Exergie (W)	-4594378,84

Tableau A III-2 - Courant hydrogène de sortie

Débit H ₂ (mol/s)	100
Débit H ₂ O (mol/s)	0,05
Température (°C)	21,7
Pression (Bar)	50
Enthalpie (J/mol)	-94,93
Entropie (J/mol/K)	-32,70
Exergie (W)	949619,86

Tableau A III-3 - Courant oxygène de sortie

Débit O ₂ (mol/s)	50
Débit H ₂ O (mol/s)	0,09
Température (°C)	124,4
Pression (Bar)	1
Enthalpie (J/mol)	-2536,98
Entropie (J/mol/K)	-9,77
Exergie (W)	16349,43

Annexes chapitre V

Décomposition du coût de la turbomachine [FOU05]

Tableau A V-1 - Décomposition des coûts de fabrication du PCS [FOU05].

Poste de coût.	Masse (tonnes)	% masse global	Part coût matière (%)	Part du coût total (%)
Conteneurs	1840,0	54,3	36,0	7,6
Échangeurs	677,0	19,9	3,0	33,1
Récupérateur He/He	18,4		4,4	
Precooler	14,6		2,0	
Intercooler	16,3		2,4	
Turbomachine (turbine + compresseurs)	331,2	9,8	1,7	32,6
Turbine	27,1		1,6	
Compresseur BP	6,4		0,9	
Compresseur HP	8,1		1,0	
Alternateur	289,6		2,6	
Circulation de l'hélium	280,9	8,3	20,0	2,1
Entrée turbine	34,0		21,5	
De Turbine à entrée Compresseur BP	50,0		21,0	
De turbine BP à sortie PCS	196,9		19,6	
Support, arbre et paliers	260,6	7,7	2,7	14,4
Support principal	73,3		13,1	
Support secondaire	12,0		5,0	
Support des échangeurs	94,7		20,7	
Support auxiliaire	1,6		5,8	
Arbre du cœur	18,6		3,1	
Paliers	45,5		0,6	
Virole auxiliaire	14,9		29,9	
Assemblage final				10,2