



## **Rapport final**

**Action "Thermoptim" dans le cadre d'UNIT  
réalisée par le Groupe des Ecoles des Mines**

**Convention n° 2008-4**

**décembre 2009**

**Porteur du projet : R. Gicquel  
Ecole des Mines de Paris**

## 1. Introduction

La Convention n° 2008-4 signée le 21 janvier 2009 correspond à la cinquième phase du projet Thermoptim au sein d'UNIT. Le présent rapport final, établi en décembre 2009, rend compte de l'exécution du programme de travail correspondant à cette convention.

## 2. Avancement des activités prévues dans le cadre de la cinquième phase

### 2.1. Rappel des activités prévues

Comme indiqué dans l'annexe technique de la Convention n° 2008-4, les travaux prévus comprennent :

- la poursuite du développement du portail Thermoptim-UNIT en rédigeant notamment des guides méthodologiques à l'attention des élèves et des enseignants, portant sur le dimensionnement technologique et le comportement des systèmes énergétiques en régime non-nominal
- la poursuite la démarche de gestion documentaire autour de la chaîne éditoriale SCENARIchain

### 2.2. Poursuite de la réalisation du portail Thermoptim-UNIT

Rappelons que la rubrique **Guides méthodologiques** regroupe diverses recommandations méthodologiques destinées à faciliter le calcul des systèmes énergétiques. Son principal objectif est de sensibiliser l'apprenant aux diverses problématiques abordées et de suggérer quelques pistes pour trouver des solutions appropriées, sans chercher à les traiter de manière exhaustive.

Les thèmes mentionnés dans la convention, le dimensionnement technologique et le comportement des systèmes énergétiques en régime non-nominal, constituent des sujets d'intérêt majeur pour l'optimisation du fonctionnement de ces systèmes. Sur le plan méthodologique, ils soulèvent de nombreuses difficultés, qui justifient qu'une attention particulière leur soit accordée dans notre portail.

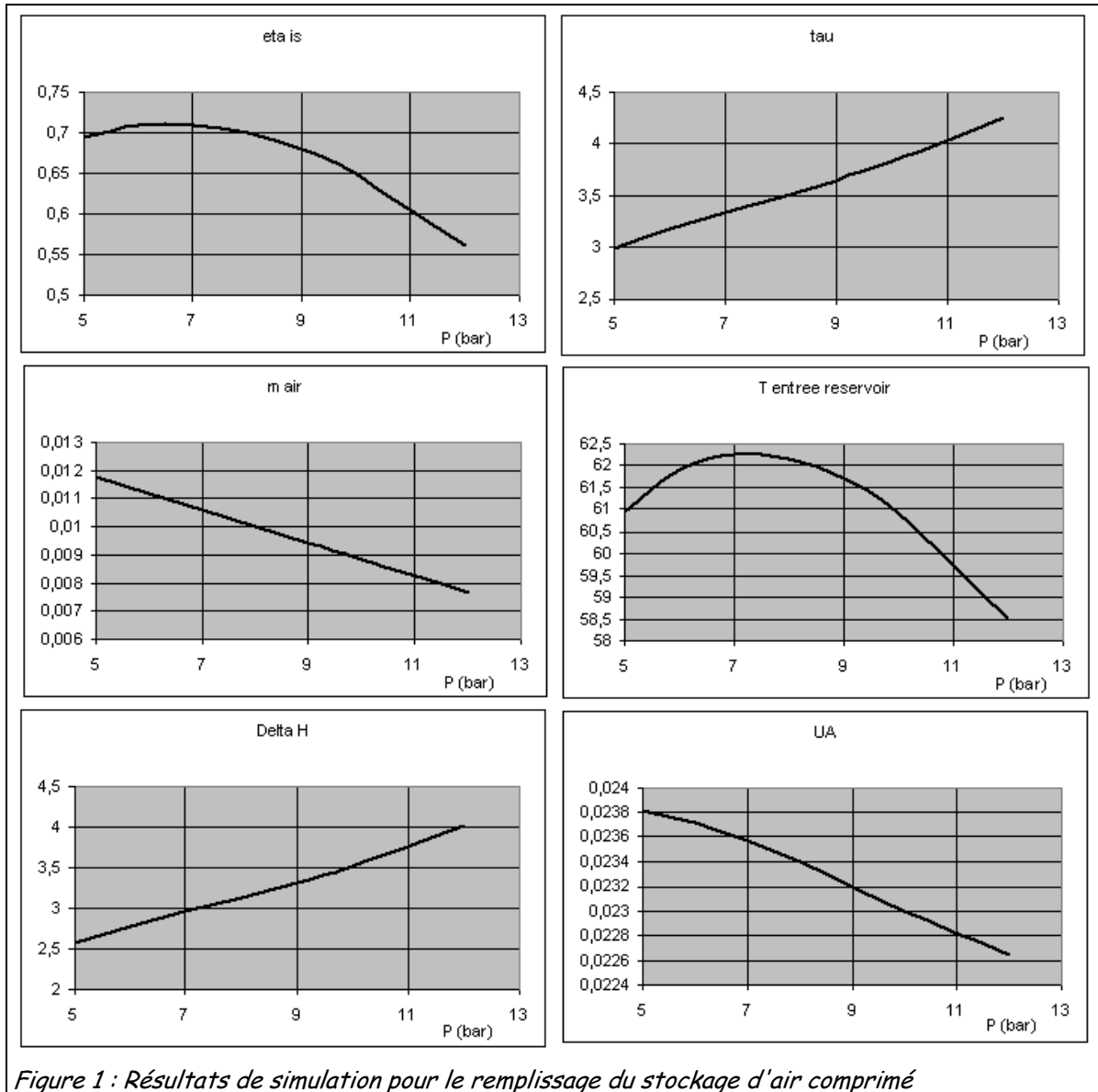
Nous avons donc créé une sous-rubrique<sup>1</sup> intitulée "**dimensionnement technologique et fonctionnement en régime non-nominal**", où est expliqué comment effectuer ce type d'études, en utilisant notamment les nouveaux écrans qui ont été ajoutés à Thermoptim à cette fin.

Afin d'expliquer le plus clairement possible l'ensemble des développements qui rendent possible ces nouvelles études, trois modèles de pilotes ont été ajoutés à la modélothèque. Le premier<sup>2</sup>, relativement simple, montre comment étudier le remplissage d'un stockage d'air comprimé grâce à un compresseur refroidi.

<sup>1</sup> [http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/dimensionnement/folder\\_contents](http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/dimensionnement/folder_contents)

<sup>2</sup> <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/pilote-compr-air>

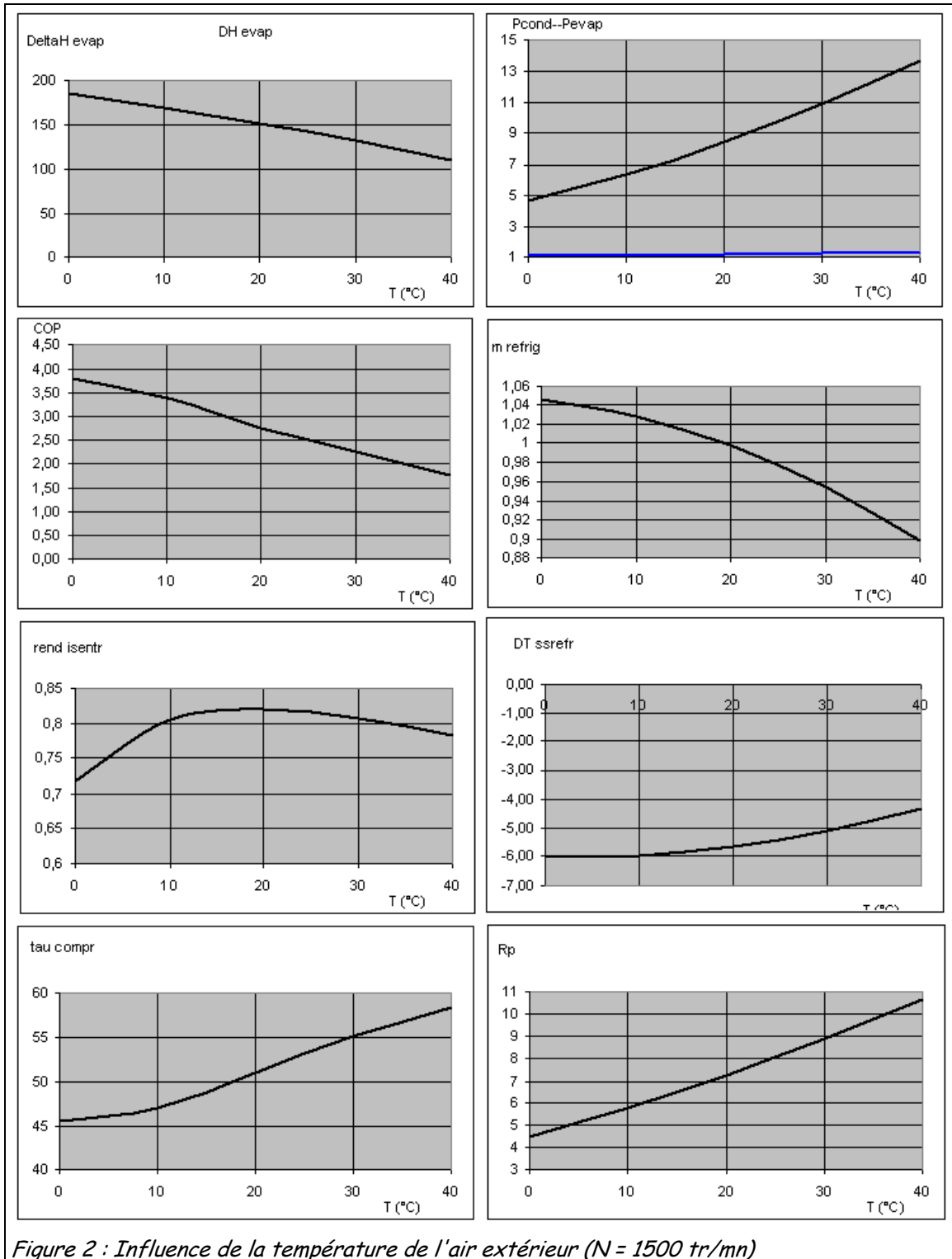
La figure 1 montre, en fonction de la pression du stockage, les évolutions du rendement isentropique du compresseur et du travail consommé, le débit d'air aspiré, la température de l'air entrant dans le réservoir, la charge de l'échangeur et la valeur de UA.



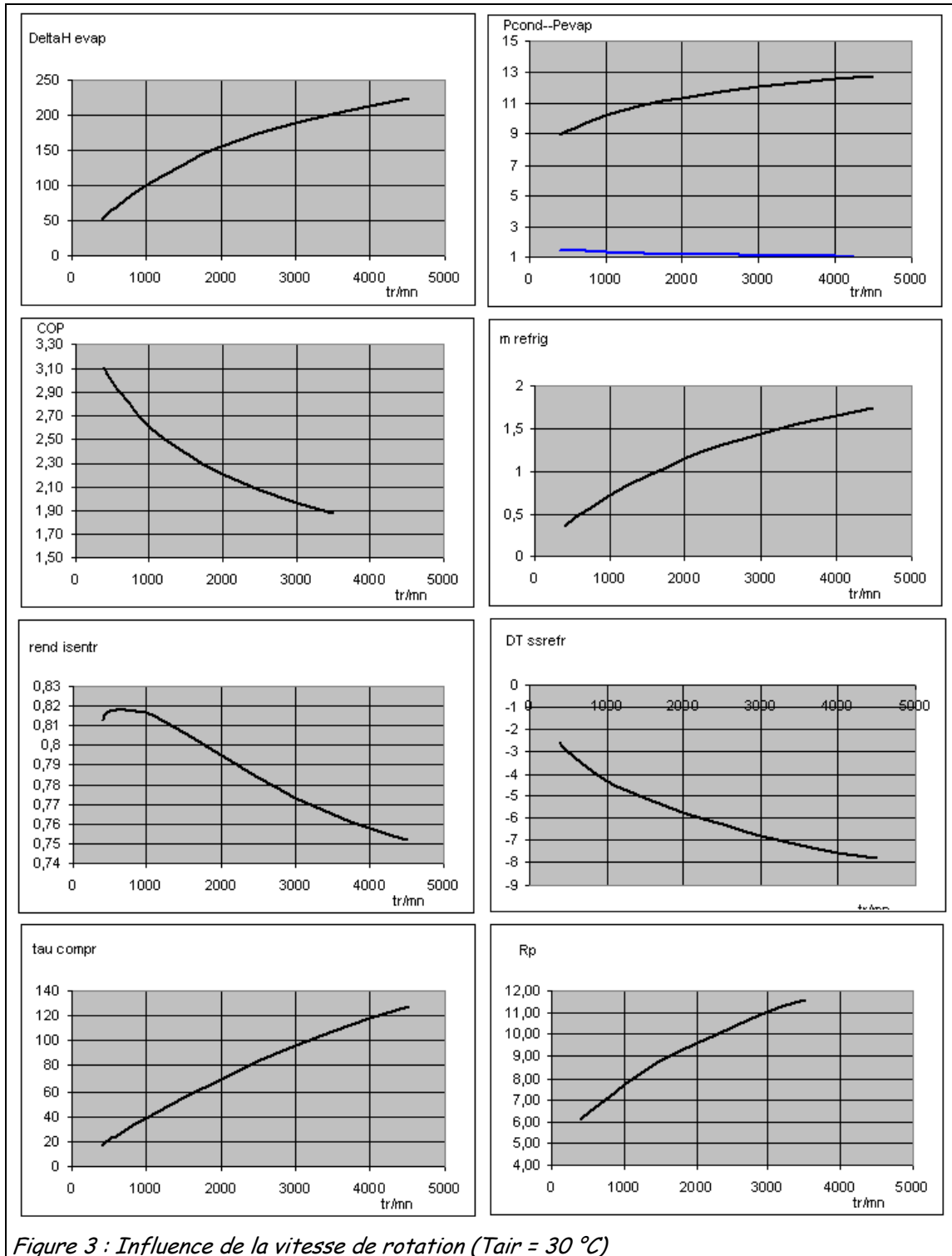
Le second pilote<sup>3</sup> présente de manière très détaillée un problème beaucoup plus complexe, celui de l'adaptation d'une machine frigorifique à la variation de la température extérieure ou de la vitesse de rotation de son compresseur, volumétrique dans un premier temps, centrifuge ensuite. Dans cet exemple, les niveaux de pression sont imposés par les équilibres thermiques des deux échangeurs à changement de phase, l'évaporateur et le condenseur, qui fixent les températures de saturation. Quant au compresseur (cas volumétrique), il impose le débit volumique de frigorigène (en fonction de

<sup>3</sup> <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/pilote-frigo-aux>

sa vitesse de rotation et du rapport de compression qui déterminent son rendement volumétrique), et donc le débit massique (fonction du volume massique de frigorigène à l'aspiration).



Les paramètres principaux de la machine frigorifique, à savoir les niveaux de pression et le débit, sont ainsi imposés par plusieurs composants fortement couplés dont le calcul ne peut plus être fait indépendamment comme c'est le cas dans les modélisations plus simples.



De surcroît, deux contraintes complémentaires sont imposées :

- les pertes de charge dans les échangeurs sont prises en compte ;
- le sous-refroidissement est déterminé en assurant la conservation de la masse globale de frigorigène contenu dans la machine.

A titre d'exemple, la figure 2 montre les résultats de simulation obtenus lorsque l'on fait varier la température de l'air de refroidissement, pour cette machine de réfrigération. L'influence de la vitesse de rotation est donnée figure 3. Elles montrent bien la non-linéarité du comportement de la machine, ce que seules des approches comme celles qui sont présentées ici peuvent permettre de déterminer.

La figure 4 montre l'écran technologique de l'évaporateur, qui donne accès à sa définition géométrique, au calcul des coefficients d'échange et des pertes de charge, et permet la détermination de la surface d'échange (ici 25 m<sup>2</sup>).

The screenshot displays the 'evaporator' configuration interface. At the top, there are navigation buttons '<' and '>'. Below them, a list of refrigerant properties is shown in red and blue text:

- h<sub>lc</sub> = 1034.62 Re = 82.69
- h<sub>lvc</sub> = 1048.18 Re = 86.27
- h<sub>vc</sub> = 1062.59 Re = 90.20
- h<sub>lf</sub> = 169.61 Re = 2685.25
- h<sub>lvf</sub> = 1702.08 Re = 2684.63
- h<sub>v</sub> = 91.86 Re = 41680.67

Under the 'water cooling' section, several parameters are set in input fields:

- free flow area: 0.08
- hydr. diameter: 0.01
- length: 3
- surface factor: 1
- fin efficiency: 1

The correlation settings for water cooling are: 'ext\_tube | Colburn correlation for single phase flow outside tubes'. The resulting values are:

- local ΔP loss coeff.: 0
- pressure drop: 0.037303
- friction factor: 0.741931

The 'evaporator' section has the following parameters:

- free flow area: 0.02
- hydr. diameter: 0.01
- length: 3
- surface factor: 1
- fin efficiency: 1

The correlation settings for the evaporator are: 'evap | Gungor Winterton correlation for evaporation inside tubes and a...'. The resulting values are:

- local ΔP loss coeff.: 0
- pressure drop: 0.012612
- friction factor: 0.046713

Other visible elements include a 'Quit' button, an 'e/λ' input field with value 0, and an 'Hx design area' input field with value 24.99916.

Figure 4 : Ecran technologique de l'évaporateur

Le troisième pilote<sup>4</sup> traite, de manière analogue au précédent, de l'adaptation d'une centrale à vapeur à la variation de la température du fluide de refroidissement ou de la pression maximale du cycle.

Les fiches thématiques des échangeurs de chaleur et des compresseurs et turbines ont été profondément remaniées et complétées pour expliquer comment effectuer les calculs nécessaires pour obtenir ces résultats, avec de nombreux détails sur les hypothèses de modélisation retenues et sur les méthodes de calcul employées.

Des développements poussés ont dû pour cela être effectués et mis en ligne sur la modélisation des cartographies des turbocompresseurs et des turbines<sup>5</sup>. A titre d'exemple, la figure 5 montre l'ajustement paramétrique non linéaire de la cartographie d'un compresseur axial.

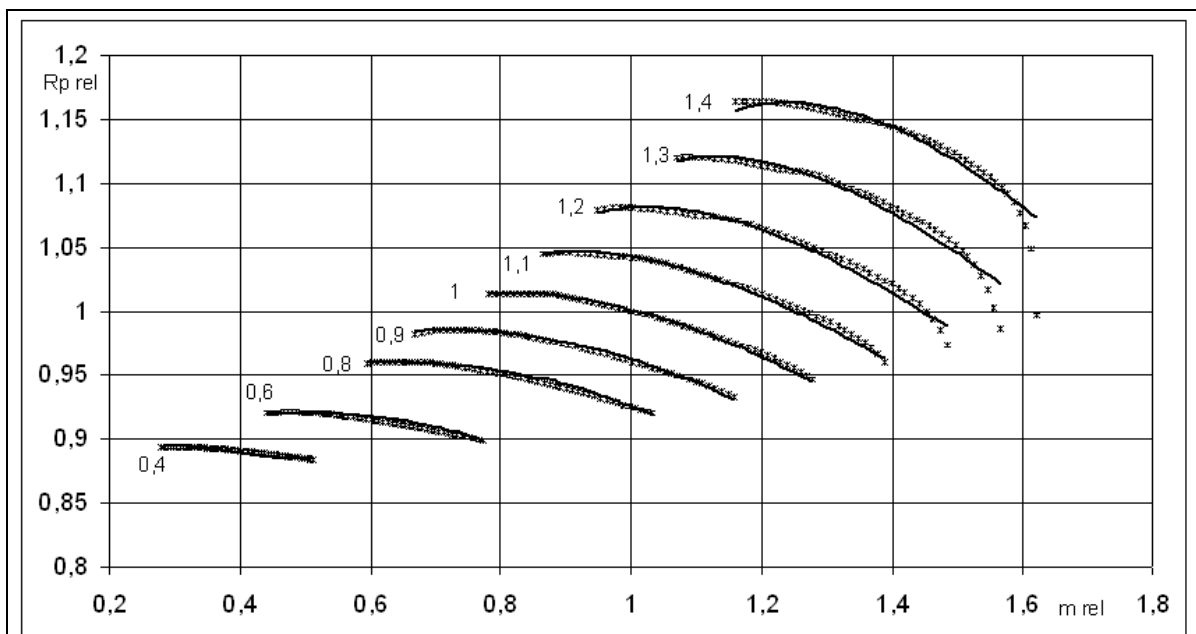


Figure 5 : cartographie adimensionnée d'un turbocompresseur axial

Le tome 4 du manuel de référence de Thermoptim consacré à ces développements a été rédigé et publié dans le portail Thermoptim-UNIT.

En complément de ces actions explicitement identifiées dans l'annexe technique de la convention, de nombreuses ressources ont été développées et mises en ligne : fiches thématiques sur le dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre, nouveaux modèles de corps et composants pour Thermoptim, séances Diapason réalisées en collaboration avec la Marine Nationale.

<sup>4</sup> <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/pilote-vapeur>

<sup>5</sup> <http://www.thermoptim.org/SE/seances/C01/ModelisationSimplifieeTurbomachines.pdf>

### **2.3. Poursuite de la démarche de gestion documentaire autour de la chaîne éditoriale SCENARIchain**

Les développements réalisés sur le portail à partir de mars 2009 ont tous été d'abord effectués dans ScenariChain, puis transférés sous CPS en utilisant la seconde interface dédiée basée sur XSLT permettant de générer des pages html compréhensibles par cet environnement.

Dans un premier temps diverses fonctionnalités manquaient dans le modèle éditorial Opale GEM (liens internes, images au format jpg, tableaux avec pointeurs, gestion du multilingue, activités de TD Thermoptim), comme nous l'avons indiqué dans le précédent rapport. Dans ces conditions, les fichiers transférés entre ScenariChain et CPS devaient être systématiquement corrigés. La nouvelle version d'Opale GEM en cours de réalisation a dans une large mesure permis de pallier ces insuffisances, et nous espérons que la future version permettra de tout résoudre.

### **2.4. Réflexions pédagogiques**

Les réflexions pédagogiques au sein de la Communauté se sont poursuivies et ont permis d'affiner les méthodes proposées en tenant compte des retours d'expérience maintenant disponibles. Elles ont fait l'objet d'une présentation lors du Printemps d'UNIT à Saint Etienne.

Ces réflexions seront partagées au sein du groupe de travail UNIT sur la pédagogie en cours de constitution.

Dans le cadre du partenariat avec la Marine Nationale, une comparaison est effectuée entre les approches académiques basées sur des présentations disciplinaires et d'autres plus finalisées mieux adaptées à des apprenants essentiellement motivés par les applications concrètes du savoir enseigné.