



HAL
open science

Aide à la conception d'opérations de traitement thermique et estimation des distortions en résultant par exploitation de connaissances expertes

Élise Vareilles, Michel Aldanondo, Pascal Lamesle, Paul Gaborit

► **To cite this version:**

Élise Vareilles, Michel Aldanondo, Pascal Lamesle, Paul Gaborit. Aide à la conception d'opérations de traitement thermique et estimation des distortions en résultant par exploitation de connaissances expertes. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-01771187

HAL Id: hal-01771187

<https://hal.science/hal-01771187v1>

Submitted on 23 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Aide à la conception d'opérations de traitement thermique et estimation des distortions en résultant par exploitation de connaissances expertes

É. VAREILLES^a, M. ALDANONDO^a, P. LAMESLE^a, P. GABORIT^a

*a. Université de Toulouse / Mines d'Albi
route de Teillet, cmapus Jarlard
81009 Albi cedex 09*

Résumé :

Cet article présente les résultats d'un projet européen dont l'objectif est d'aider à la conception d'opérations de traitement thermique. Pour cela, de la connaissance experte a été capitalisée et formalisée pour d'une part, aider à la définition d'une opération de traitement thermique et d'autre part, estimer les distortions en résultant. Après une présentation du contexte de ce projet, l'extraction des connaissances et leur formalisation par des approches par contraintes seront présentées. Deux modes d'utilisation de l'environnement d'aide à la conception d'opérations de traitement thermique seront alors présentés.

Abstract :

This paper presents the results of a European project which deals with an interactive aiding design tool for heat treatment process. Some knowledge has been collected and formalized in order to, on the first hand, design a heat treatment operation and in the other hand, quantify the final distortion. After a brief presentation of the project context, the extraction of the know-how and its formalization as a constraint satisfaction problem are presented. Two running modes of the tool are also presented.

Mots clefs : Aide à la décision, traitement thermique, problème de satisfaction de contraintes, knowledge management

1 Introduction

Les travaux présentés dans cet article se sont déroulés dans le cadre du projet européen *VHT*¹, concernant la mise au point d'un environnement interactif d'aide à la conception d'opérations de traitement thermique de trempe avec ou sans cémentation, sans recourir à la simulation *FEM*. Outre la définition cohérente de l'opération de traitement thermique, l'environnement doit permettre à l'utilisateur de minimiser les déformations se produisant suite aux changements de phase des aciers et aux gradients thermiques au sein de la pièce traitée. Ces déformations sont en effet préjudiciables car elles peuvent conduire la pièce traitée soit à un nouvel usinage pour lui rendre sa forme originelle, soit à sa mise au rebut. C'est pourquoi les fabricants sont à la recherche de méthodes et d'outils leur permettant de définir le processus de traitement thermique et d'évaluer les déformations en résultant.

Aujourd'hui, la seule méthode disponible pour prédire les déformations consiste à simuler le traitement thermique par des approches de type éléments finis ou *FEM*. L'utilisation de ces logiciels nécessite un nombre important de données d'entrées : données thermophysiques, thermochimiques, cinétiques, mécaniques et chimiques qui sont complexes à obtenir et qui font toujours l'objet de recherches. Plusieurs données importantes, telles que l'historique des matériaux ou la géométrie de la charge, ne peuvent être prises en compte dans de telles approches. De plus, ces dernières nécessitent un savoir-faire pour, par exemple, identifier et simuler les différents coefficients d'échanges thermiques à la surface des pièces et consomment énormément de temps, jusqu'à plusieurs jours de calcul pour une simulation. Leur utilisation est donc limitée industriellement aux entreprises spécialisées dans un procédé et un acier donnés. Pourtant, les traiteurs à façon arrivent à choisir le procédé conduisant à la dureté souhaitée tout en minimisant les déformations, par l'exploitation de connaissances empiriques.

La mise au point de l'outil d'aide à la conception à base de contraintes (ou *CSP*) a duré trois ans et a nécessité différentes phases menées en parallèle :

– extraction des connaissances à partir d'entretiens avec des experts industriels et scientifiques,

¹Virtual Heat Treatment, projet n : GIRD-CT-2002-00835.

- validation de ces connaissances par des essais,
- formalisation des connaissances validées sous forme de *CSP*,
- spécification et mise au point du moteur de propagation de contraintes exploitant les connaissances formalisées [1].

Les problèmes de satisfaction de contraintes ou *CSPs* (*Constraint Satisfaction Problems*) permettent de modéliser de la connaissance et de raisonner sur celle-ci afin de trouver l'ensemble des solutions compatibles avec un problème courant. Les premiers problèmes de satisfaction de contraintes ont été définis par [2] il y a une trentaine d'année. Les problèmes de satisfaction de contraintes sont définis comme un triplet $(\mathbb{V}, \mathbb{D}, \mathbb{C})$ où :

- $\mathbb{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ est un ensemble fini de variables,
- $\mathbb{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ est un ensemble fini de domaines de définition des variables,
- $\mathbb{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ est un ensemble fini de contraintes portant sur les variables et décrivant les combinaisons de valeurs autorisées de celles-ci.

Les emplois des CSP en aide à la conception sont variés : la conception d'avion [3], de ponts [4], d'appareils à pression [5], de système de câblage [6] ou plus proche de notre champs d'application [7] pour concevoir des opérations d'usinage. Réaliser un modèle de connaissance à partir de *CSP* revient à traduire les connaissances empiriques et expertes sous forme d'éléments du triplet $(\mathbb{V}, \mathbb{D}, \mathbb{C})$ [8].

En s'inspirant de modèles de traitement thermique tirés de la littérature, comme celui de [9], un modèle portant sur la famille des axes cylindriques présenté dans cette communication, a été élaboré. Celui-ci permet à la fois de concevoir une opération de traitement thermique et d'estimer les distorsions en résultant.

Nous allons, dans un premier temps, présenter l'architecture générale du modèle en termes de variables, de contraintes et de groupes. Nous aborderons, dans la deuxième section, les deux modes d'exploitation possible de ce modèle, à savoir la prédiction des distorsions à partir de la description d'une opération de traitement thermique et la conception d'une opération minimisant les risques de déformations.

2 Élaboration du modèle de connaissance

L'extraction des connaissances du domaine s'est effectuée en groupe de travail et a duré près de deux ans. En s'inspirant de modèle de la littérature comme [9], le groupe d'experts a proposé des modèles intermédiaires [10], [11] et [12] pour déboucher sur le modèle d'axe cylindrique présenté dans cette section. L'architecture globale du modèle est présentée dans un premier temps, suivi des modèles de distorsion dite "potentielle" puis "finale".

2.1 Architecture générale

Le modèle de connaissances met en oeuvre des variables caractérisant l'opération de traitement thermique et des attributs nécessaires à la quantification des déformations. Il a été établi, lors de la phase d'extraction, que :

- la déformation est un vecteur à cinq composantes (notée D_i),
- un ensemble de variables $\{P_1\}$ induit l'existence de chaque composante de déformation et permet une première évaluation dit *potentielle* de chaque composante de la déformation (attributs de déformation potentielle I_p^i),
- un nombre plus conséquent de variables $\{P_2\}$ amplifie ou réduit les valeurs de toutes les composantes de manière identique, à l'aide de vingt-six multiplicateurs (attributs de modulation m^j),
- l'intensité de déformation dite *finale* de chaque composante (attributs de déformation I_f^i) correspond au produit de l'intensité potentielle par composante (attributs de déformation I_p^i) par les attributs de modulation (attributs de modulation m^j) :

$$D = \bigcup_{i=1}^5 \{D_i : I_f^i = I_p^i \times \prod_{j=1}^{26} m^j\}$$

Il est à noter qu'un ensemble de variables appartient à la fois à l'ensemble P_1 et P_2 et qu'il existe des contraintes entre les variables de $\{P_1\}$ et les variables de $\{P_2\}$ qui correspondent aux faisabilités techniques. La figure 1 synthétise ces éléments pour un exemple comportant deux composantes de déformation D_1 et D_2 , d'intensité potentielle I_p^1 et I_p^2 et finale I_f^1 et I_f^2 , deux attributs de modulation m^1 et m^2 , cinq variables appartenant à $\{P_1\}$ et six variables appartenant à $\{P_2\}$.

2.2 Composantes de déformation

La déformation est un vecteur à cinq composantes notées D_i . Celles-ci correspondent aux déformations :

« **bobine-tonneau** » pour D_1 Pour des raisons essentiellement métallurgiques, un axe cylindrique peut prendre la forme d'une bobine ou d'un tonneau, tel que l'illustre la figure 2.

« **banane** » pour D_2 Pour des raisons liées entre autre à la direction de circulation du fluide de trempe et à la présence d'une dissymétrie, un axe cylindrique peut prendre la forme d'une banane, tel que l'illustre la figure 3.

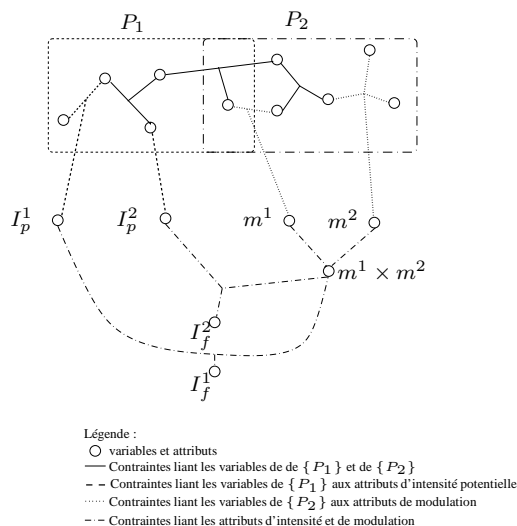


FIG. 1 – Architecture générale du modèle de connaissance

« **écartement-resserrement** » pour D_3 En présence de trous aux extrémités, un phénomène d'écartement ou de resserrement de l'extrémité peut être observé, tel que l'illustre la figure 4.

« **ovalisation** » pour D_4 En présence d'un trou débouchant et d'une pièce mal positionnée, un phénomène d'ovalisation peut être observé, tel que l'illustre la figure 5.

« **parapluie** » pour D_5 En présence d'un épaulement mince, celui-ci peut se déformer suivant une forme « parapluie » dont la poignée est orientée à droite ou à gauche, tel que l'illustre la figure 6.

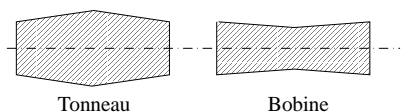


FIG. 2 – Déformation « bobine-tonneau »



FIG. 3 – Déformation « banane »

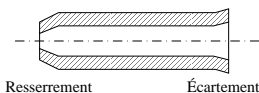


FIG. 4 – Déformation « écartement-resserrement »

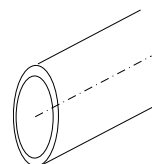


FIG. 5 – Déformation « ovalisation »

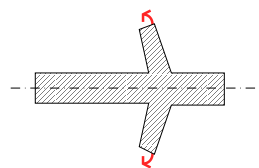


FIG. 6 – Déformation « parapluie »

Seules deux composantes sont systématiquement à considérer : la composante « bobine-tonneau » (D_1) et la composante « banane » (D_2). Les composantes « écartement-resserrement » (D_3) et « ovalisation » (D_4) sont susceptibles d'être prises en compte lors de la présence de trous aux extrémités, la composante « parapluie » (D_5) lors de la présence d'épaulements significatifs.

2.3 Paramètres, distorsions potentielles et contraintes

Le premier dimensionnement des déformations potentielles par composante est lié aux variables de l'ensemble $\{P_1\}$. Ces variables caractérisent :

- la morphologie de l'axe de la pièce (épaisseur, diamètre, épaulement, trou, ...),
- le type de calage de l'axe lors de la trempe (suspendu, posé, calé, ...),
- la direction du fluide de trempe (perpendiculaire, parallèle),
- l'acier utilisé (30CrNiMo8, 42CrMo4, 90MnV8, ...).

Une vingtaine de variables de type P_1 ont été identifiées pour définir les intensités potentielles de chacune des composantes de déformation I_p^i .

La modulation des intensités de chacune des déformations potentielles est réalisée à partir des variables $\{P_2\}$. Ces variables sont rassemblées en six ensembles caractérisant :

- le fluide de trempé (type de fluide, vitesse, agitation, ...),
- la préparation de la charge (perméabilité du support, distance entre les pièces trempées, rapport poids charge/poids maximum four, ...),
- la géométrie générale (nombre d'axe de symétrie de la pièce, rapport épaisseur maximale/diamètre maximum, variation épaisseur, ...),
- les caractéristiques métallurgiques (trempabilité du matériau, cémentation, ...),
- l'historique du matériau (processus d'obtention du brut, relaxation, ...),
- le cycle de chauffe (classe du four de chauffe, vitesse de chauffe, ...).

De l'ordre de 70 variables de type P_2 ont été identifiées et sont associées aux 26 attributs de modulation m^j . Ce sont les combinaisons de valeurs des variables de $\{P_1\}$ et $\{P_2\}$ qui vont valuer les attributs d'intensité potentielle I_p^i et de modulation m^j . Par exemple, le sixième attribut de modulation m^6 , appartenant au groupe correspondant au fluide de trempé, dépend de la nature du fluide, variable $N_FdT \in P_2$, de son agitation, variable $A_FdT \in P_2$ et de sa direction par rapport à l'axe de la pièce trempée, variable $D_FdT \in P_1$. La table 1 présente cette relation.

TAB. 1 – Exemple de relation entre les variables de $\{P_1\}$ et $\{P_2\}$ et $\{I_p^i, m^j\}$

N_FdT	A_FdT	D_FdT	m^6
liquide	turbulent	∇	[1.047, 1.093]
liquide	orienté	parallèle	[1.163, 1.187]
liquide	orienté	perpendiculaire	[1.187, 1.467]
gaz	turbulent	∇	[1, 1.093]
gaz	orienté	parallèle	[1.093, 1.163]

2.4 Intensité finale de déformation

Les valeurs des cinq attributs de déformation potentielle I_p^i et des 26 attributs de modulation m^j ont été évaluées par les experts. Puis, elles ont été normalisées pour que l'intensité de déformation finale I_f^i de chaque composante D_i soit comprise dans l'intervalle $[1, 1000]$. La valeur 1 correspond à une intensité de déformation négligeable, la valeur 1000 a une intensité maximale de déformation.

Pour cela, l'influence des groupes de variables $\{P_1\}$ et $\{P_2\}$ a été étudiée par les experts qui ont conclu que :

- l'influence du groupe $\{P_1\}$ est de 30% : $\forall i, I_p^i \in [1, 20]$.
- l'influence du groupe $\{P_2\}$ est de 70% : $\prod_{j=1}^{26} m^j \in [1, 50]$.

La répartition de l'influence des six ensembles de variables de $\{P_2\}$ a de même été étudiée. Le tableau 2 présente les résultats obtenus.

TAB. 2 – Influence des six ensembles de variables de $\{P_2\}$

Ensemble	Influence	Nombre d'attributs de modulation	Valeurs
Fluide de trempé	35 %	6	[1, 3.82]
Préparation de charge	20%	3	[1, 2.16]
Métallurgie	15%	3	[1, 1.78]
Géométrie	15%	2	[1, 1.78]
Historique du matériau	10%	8	[1, 1.53]
Cycle de chauffe	5%	4	[1, 1.24]

3 Exploitation

Une maquette développée en *Perl* nous a permis de valider les modèles. Elle est accessible sur Internet à l'adresse suivante :

<http://cofiade.enstimac.fr/cgi-bin/cofiade.pl>

Le modèle exposé dans la section précédente est accessible en ligne et se nomme *VHT*. Nous présentons dans cette section les deux modes d'exploitation de cet outil.

3.1 Mode 1 : prédiction des déformations

En mode « prédiction des déformations », l'outil d'aide à la conception fournit des résultats conformes aux attentes des industriels :

- les choix de conception se répercutent *via* les contraintes sur l'ensemble du modèle en restreignant, de manière cohérente, les domaines de définition des variables,
- les temps de réponse sont tout à fait compatibles avec un mode interactif (de l'ordre de la seconde),
- et globalement, les résultats fournis sont cohérents avec les prédictions de déformations faites par les experts.

Nous illustrons ce mode de fonctionnement sur un exemple de traitement thermique de trempe. La pièce étudiée est un axe sans trou à ses extrémités et sans épaulement en acier 42CrMo4. Les réductions des intensités de déformations finales I_f des composantes « bobine-tonneau » et « babane », suite à la saisie des valeurs décrivant :

1. la géométrie de la pièce,
2. le fluide de trempe,
3. la préparation de la charge,
4. le matériau et son historique avant traitement,
5. les caractéristiques métallurgiques et le cycle de chauffe.

sont illustrées sur la figure 7.



FIG. 7 – Réduction des intensités de déformation

3.2 Mode 2 : conception d'opérations de traitement thermique

Le mode « conception d'opérations de traitement thermique » autorise l'utilisateur à contraindre les intensités de déformation finales I_f^i pour laisser l'outil caractériser certains paramètres de l'opération de traitement thermique (choix de l'orientation de la pièce, du cycle de chauffe, par exemple).

Ce mode d'utilisation fournit des résultats satisfaisants, mais possède certaines limites : il peut en effet générer des problèmes de cohérence. En effet, les méthodes de filtrage employées pour garantir l'interactivité de l'outil ne répercutent les choix utilisateurs uniquement de manière locale *via* les contraintes et non de manière globale. Les choix de conception peuvent alors conduire le problème à devenir incohérent.

L'utilisation de méthodes de filtrage des *CSP* plus poussées permettraient d'éviter ce problème d'incohérence. Mais, ces méthodes de filtrage compromettraient l'interactivité du système. L'adoption d'une démarche *essai-erreur* peut permettre de contourner ce problème.

4 Conclusion

Cet article a présenté l'un des modèles de connaissances que nous avons réalisé avec les experts industriels et scientifiques du projet européen *VHT*. Ce modèle fait intervenir des connaissances se formalisant de différentes manières à l'aide des *CSPs*. Celui-ci permet à la fois de concevoir une opération de traitement thermique et de prédire, de manière qualitative, les déformations en résultant. Il se compose de :

- 20 variables de type $\{P_1\}$, 70 variables de type $\{P_2\}$,

- 26 coefficients de modulation m^j dont le produit appartient à l'intervalle $[1, 50]$,
- 5 intensités potentielles de déformation I_p^i comprises dans l'intervalle $[1, 20]$,
- 5 intensités finales de déformation I_f^i égales au produit des I_p^i par les m^j . L'intensité de déformation finale de chaque composante est ainsi comprise dans l'intervalle $[1, 1000]$,
- plus d'une centaine de contraintes entre les variables du modèle.

Si le mode « prédiction des déformations » ne pose pas de problème particulier, le mode « conception de traitement thermique » ne garantit pas l'atteinte d'une solution. Ceci est simplement due au choix de méthodes de filtrage qui ne répercutent que localement les choix de conception mais qui garantissent l'interactivité de l'outil.

Deux faiblesses peuvent être notées sur les deux modes d'exploitation. D'une part, les intensités de déformation pour chacune des composantes de déformation sont représentées par des intervalles de valeurs qui n'ont actuellement aucun sens dans l'absolu. Seule la comparaison d'opérations est véritablement exploitable. D'autre part, aucune information sur la dureté de l'acier après trempe n'est fournie à l'utilisateur. Or, le but des traitements de trempe est d'améliorer la dureté superficielle des aciers.

L'outil d'aide à la conception à base de contraintes répond aux attentes des industriels en termes de résultats fournis et de temps de réponses. Différentes améliorations sont néanmoins à mettre en oeuvre au niveau du modèle de connaissances. Celui-ci doit être complété pour :

- interpréter les résultats dans l'absolu,
- estimer la dureté après trempe d'un acier traité,
- prendre en compte d'autres familles de pièces comme celle des engrenages.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier tous les partenaires du projet VHT et notamment Mme Kaufman, M. Baron, M. Panades et M. Veaux pour des réunions où l'obtention de compromis a parfois été difficile.

Références

- [1] Vareilles E. Conception et approches par contraintes : contribution à la mise en oeuvre d'un outil d'aide interactif. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [2] Montanari U. Networks of constraints : fundamental properties and application to picture processing. In Information sciences, volume 7, pages 95–132, 1974.
- [3] Mulyanto T. Utilisation des techniques de programmation par contraintes pour la conception d'avions. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France, 2002.
- [4] Gelle E. On the generation of locally consistent solution spaces in mixed dynamic constraint problems. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1998.
- [5] Fischer X. Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée : application aux appareils à pression. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2000.
- [6] Aldanondo M., Lamothe J., and Hadj-Hamou K. Configuration and cad modeler : gathering the best of two worlds. In IJCAI Workshop on Configuration, pages 1–7, 2001.
- [7] Geneste L., Ruet M., and Monteiro T. Configuration of a machining operation. In European Conference on Artificial Intelligence, Berlin, 2000.
- [8] Vernat Y. Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire. Thèse de doctorat, École Nationale des Arts et Métier, Bordeaux, France, 2004.
- [9] Oliveira M., Moreira A., Loureiro A., Denis S., and Simon A. Effet du mode de refroidissement sur les déformations produites par la trempe martensitique. In 5^e congrès international sur les traitements thermiques des matériaux, pages 1814–1821, Budapest, Hongrie, 1986.
- [10] David P., Veaux M., Vareilles E., and Maury J. Virtual heat treatment tool for monitoring and optimising heat treatment process. In 2nd International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation, Nancy, 2003.
- [11] Aldanondo M., Vareilles E., Lamesle P., Hadj-Hamou K., and Gaborit P. Modélisation et exploitation des connaissances en design for x : une application en traitement thermique. In 6^{ième} congrès International de Génie Industriel, Besançon, France, 2005.
- [12] É. Vareilles M. A. and Gaborit P. Evaluation and design : a knowledge-basec approach. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 20(7), 639–653, October-November 2007.