



**HAL**  
open science

# Application de la mécanotransduction au suivi et à l'optimisation de la fabrication et de l'utilisation de pièces en composites moulées par RTM

Patricia Krawczak, Christophe Binetruy, José Pabiot

► **To cite this version:**

Patricia Krawczak, Christophe Binetruy, José Pabiot. Application de la mécanotransduction au suivi et à l'optimisation de la fabrication et de l'utilisation de pièces en composites moulées par RTM. MECANO 2000, May 2000, Champs-sur-Marne, France. pp.99-106. hal-01781028

**HAL Id: hal-01781028**

**<https://hal.science/hal-01781028>**

Submitted on 28 Apr 2018

**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.

---

# Application de la mécanotransduction au suivi et à l'optimisation de la fabrication et de l'utilisation de pièces en composites moulées par RTM

**Patricia Krawczak, Christophe Binétruy, José Pabiot**

ECOLE DES MINES DE DOUAI,

Département Technologie des Polymères et Composites,

941 rue Charles Bourseul, B.P. 838, 59508 DOUAI Cedex, FRANCE

e-mail: [plastics@ensm-douai.fr](mailto:plastics@ensm-douai.fr)

---

*RESUME: Cet article présente les premiers résultats d'un projet dont la finalité est l'optimisation couplée matériau - procédé - produit, appliquée aux composites moulés par injection de résine sur renforts textiles (RTM). Le principe est de fonctionnaliser des composites à fibres de verre et matrice organique par instrumentation des renforts positionnés dans le moule avec des capteurs résistifs en fibre de carbone, dont on suit l'évolution de la résistance électrique: ① d'abord lors du processus d'élaboration de la pièce (suivi du remplissage du moule, intelligence du procédé de fabrication). Les premiers résultats expérimentaux ont démontré la faisabilité de la méthode. ② ensuite après polymérisation de la résine, lors de l'utilisation de la pièce (suivi de l'endommagement sous l'effet de sollicitations mécaniques, intelligence de la structure). L'étude de base réalisée a permis de valider la méthode sur une "structure intelligente" industrielle de géométrie de révolution sous sollicitation complexe avec modélisation de la réponse du capteur (possibilité de maintenance préventive).*

---

## 1. Etat de l'art

### 1.1. Sur le suivi des écoulements et la conduite du procédé RTM ...

Le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) est largement utilisé pour fabriquer des pièces en composites de grandes dimensions, de forme complexe et de hautes performances. Cette technologie consiste à imprégner une préforme fibreuse par une résine liquide sous basse pression. Après polymérisation de cette dernière, la pièce en composites est démoulée. Dans le cas de pièces techniques, la connaissance en temps

réel de la position du front d'avancée de résine peut s'avérer déterminante pour assurer une qualité de pièce satisfaisante, quelles que soient les variations de propriétés locales des matériaux de base. En dépit des efforts de multiples équipes scientifiques et industrielles, il n'existe malheureusement pas encore d'outil de simulation capable de prévoir avec précision les mouvements de résines dans des pièces techniques. Plusieurs difficultés inhérentes à la technologie RTM permettent d'expliquer l'incapacité des logiciels à satisfaire les attentes des industriels, tels que le choix du nombre et de la position des points d'injection et des événements, ou encore, le mauvais positionnement des renforts dans la cavité du moule, qui génère des effets de bords ... Ces problèmes sont à l'origine de la formation en cours d'injection de défauts, qu'il est impossible de prévoir. Ceci souligne l'intérêt de disposer d'une méthode de suivi des fronts de résine dans les moules opaques, permettant en outre l'exploitation des informations recueillies au cours du processus de fabrication à des fins de limitation des rebuts de pièces.

Un certain nombre de techniques de suivi des écoulements de résine en RTM ont été développées au cours de la dernière décennie. [Schwab et al., 96] ont ainsi conçu un système à base de capteurs implantés à différents endroits du moule, qui, au passage de la résine, mesure une variation de conductivité électrique. [Wang et al., 98] utilisent quant à eux des films piézo-électriques pour détecter le passage du front de résine. De la même manière, un système de capteurs diélectriques a été développé par [Motogi et al., 99] pour suivre les mouvements du polymère liquide. [Parnas et al., 99] comparent l'information transmise par une fibre optique stratégiquement implantée dans le renfort aux résultats de simulations numériques pour détecter des situations d'écoulement anormales. [Walsh, 99] a développé le concept SMARTweave®. Les capteurs sont des fils conducteurs électriques formant un réseau non connecté. Lorsque la résine s'écoule, elle remplit les espaces situés entre les fils. Les espaces situés entre deux fils conducteurs perpendiculaires non concourants représentent le chemin de moindre résistance. Ainsi, au passage de la résine dans ces zones, un minimum de résistance électrique est mesuré, indiquant la position du front d'écoulement. Ces techniques sont parfois difficiles à mettre en oeuvre dans un contexte industriel, les capteurs étant très onéreux ou trop encombrants, ou encore générant une chute des performances mécaniques ou ne permettant pas de mesurer aisément l'endommagement mécanique de la pièce composite en service. Ces différents problèmes pourraient a priori être évacués en utilisant des mèches de carbone en tant que capteurs résistifs de position de front d'écoulement dans un composite verre/résine. C'est l'objet de la première partie du présent article que de vérifier la faisabilité de ce concept de suivi des écoulements et de l'imprégnation en RTM

## **1.2. Sur le suivi d'endommagement en service de pièces en composites ...**

Le suivi de l'endommagement des matériaux composites s'effectue jusqu'à présent par des techniques de contrôle non destructives (CND): rayons X, ultrasons, émission acoustique... Cependant ces procédés présentent plusieurs inconvénients: un investissement lourd, la difficulté d'utiliser dans de bonnes conditions ces matériels sur site et la nécessité d'immobilisation prolongée des équipements à contrôler. D'où

l'intérêt d'implanter directement des capteurs dans les matériaux composites dès leur phase de conception, afin de les rendre capables de suivre en continu, en service et in-situ, l'état d'endommagement de la pièce industrielle fabriquée. Ce concept de composites intelligents a ainsi été développé à l'Ecole des Mines de Douai dans le cas d'un matériau verre/résine, avec une finalité de maintenance préventive. Le capteur d'endommagement utilisé est, comme pour le suivi de l'imprégnation en RTM, une mèche de carbone, dont on étudie l'augmentation de résistance électrique, provoquée par l'élongation puis la rupture des fibres lors de la sollicitation de la structure. Dans un premier temps, une étude approfondie [Tamiatto, 98] a été menée sur éprouvettes afin de vérifier la faisabilité de la méthode de suivi d'endommagement, de calibrer les capteurs et d'analyser les effets de paramètres d'influence potentiels: caractéristiques physiques des mèches, structure du composite hôte, mode de sollicitation et conditions d'environnement. Les différentes méthodes de traitement des réponses du capteur ont également été discutées. La finalité de la seconde partie de ce travail, présentée ici, est de valider la méthode sur pièces industrielles en proposant une modélisation de la réponse électrique du capteur en fibres de carbone. Les structures retenues sont des tubes en composite soumis à un chargement en pression interne avec effets de fond.

## 2. Suivi de la fabrication par RTM de pièces en composites

### 2.1. Principe de mesure

Dans le but de recueillir des informations sur l'état de santé d'une pièce en composite en service, les mèches de carbone peuvent être disposées dans des directions particulières, où les contraintes sont supposées être maximales, et où les endommagements risquent de se produire préférentiellement. La figure 1 présente ainsi un renfort en verre rectangulaire sur lequel sont disposées deux mèches de carbone rectilignes, orientées à  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , formant un "V" d'angle  $\theta_1 + \theta_2$  sans pour autant être concourantes. Ces mèches sont connectées à un ohmmètre mesurant en continu la résistance électrique du circuit.

Lorsqu'une résine conductrice progresse frontalement dans la direction indiquée fig.1, elle court-circuite les deux mèches en permettant au courant de suivre un chemin continu de moindre résistance de l'ohmmètre jusqu'au front de résine. La conductivité des fibres de carbone étant très largement supérieure à celle de polymères faiblement conducteurs, et compte tenu de la géométrie en "V" et de l'orientation du front, la résistance mesurée décroît linéairement en fonction de l'avancée du front de résine. La résistance totale  $R_T$  mesurée est la somme des résistances des mèches de carbone et de la résine dans le renfort:

$$R_T = R_1(x) + R_1'(x) + R_2'(x) + R_2(x) \quad (1)$$

où  $R_1(x)$  et  $R_2(x)$  sont les résistances des portions de mèches de carbone non encore imprégnées, et où  $R_1'(x) + R_2'(x)$  représente la résistance de la résine située entre les deux mèches au niveau du front. La position du front  $x$  mesurée depuis le point d'intersection virtuel A (fig.1) et la position réelle du front  $x_f$  sont données

respectivement par les relations (2) et (3) :

$$x = R_T \left[ r \left( \frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) + r' (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$x_f = L - x \quad (3)$$

où  $r$  est la résistivité des mèches de carbone,  $r'$  celle du renfort saturé en fluide d'imprégnation, et  $L$  la longueur de renfort instrumenté.

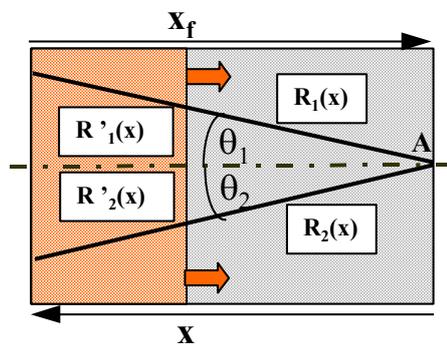


Fig.1: Principe de mesure à partir des capteurs en fibres de carbone

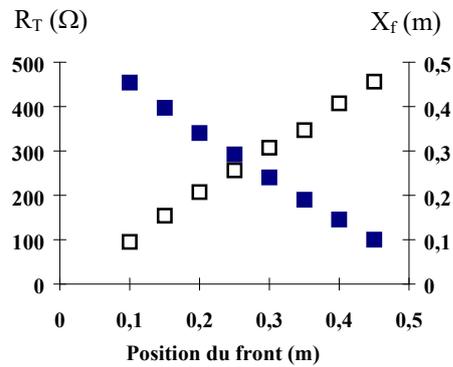


Fig.2: Réponse du capteur de suivi d'écoulement

Tableau 1. Valeur types des paramètres définis dans l'équation (2)

| L(m) | $\theta_1$ (deg) | $\theta_2$ (deg) | $r(\Omega/m)$ | $r'(\Omega/m)$ |
|------|------------------|------------------|---------------|----------------|
| 0,53 | 9                | 10               | 100           | 2500           |

## 2.2. Résultats expérimentaux

Le renfort instrumenté est obtenu en déposant sur une couche de mat de verre deux mèches de carbone de 0,5 m de longueur. La partie inférieure du moule métallique est isolée électriquement au moyen d'un film thermoplastique. La partie supérieure est en acrylique transparent (30 mm d'épaisseur), ce qui permet de suivre la progression du fluide et ainsi de comparer les mesures du capteur avec les observations. Les paramètres physiques nécessaires à la détermination des positions successives  $x_f$  et de la résistance  $R_T$  sont données dans le tableau 1. Un ohmmètre Hewlett Packard 34420A est utilisé pour mesurer la résistance électrique totale  $R_T$  et les résistivités. Un front d'écoulement linéaire est généré dans le moule en maintenant une pression d'injection constante. Le fluide d'imprégnation choisi est de l'eau teintée qui présente une conductivité électrique suffisamment élevée pour les besoins de l'expérience. La figure 2 illustre la réponse du capteur à fibre de carbone exprimée sous la forme de  $R_T$  et  $x_f$  en fonction de l'avancée du front mesurée par observation directe. Le capteur présente une réponse parfaitement linéaire pour ce type d'écoulement plan unidirectionnel.

Les premiers résultats expérimentaux démontrent ainsi la faisabilité du concept de suivi de front d'écoulement dans des renforts en verre en exploitant les propriétés électriques de la fibre de carbone. Ce capteur, peu onéreux, facile à implanter, n'affaiblissant pas les performances mécaniques du composite, est en outre compatible avec une utilisation ultérieure à des fins de suivi de l'endommagement de la pièce fabriquée sous chargements mécaniques. Des travaux complémentaires sont actuellement en cours pour étendre son champ d'application à des écoulements plus complexes.

### **3. Suivi de l'utilisation de pièces en composites**

#### **3.1. Moyens expérimentaux**

Des éprouvettes de traction sont réalisées par moulage au contact en renfort textile cousu [0/90°] de verre E/matrice vinylester avec un taux de fibres de 46% en masse. Plusieurs types de mèches de carbone, présentant des allongements nominaux à la rupture différents, sont utilisés comme capteurs résistifs. Les pièces industrielles retenues sont des tubes verre E/époxy de diamètre 100 mm bobinés à  $\pm 55^\circ$  par enroulement filamentaire. Dans ce cas, les capteurs utilisés sont placés en surface du tube et noyés dans de la résine époxy, sachant cependant que l'objectif est à terme d'intégrer au sein de la structure composite les mèches de carbone comme pour les éprouvettes. Les essais mécaniques sur éprouvettes sont effectués sur un dynamomètre ZWICK 1474, équipé d'un extensomètre, à la vitesse de 1 mm/min. La résistance de la mèche de carbone est mesurée par un système en pont diviseur ou un nano-ohmètre (HP 34420A) pour les mesures qui nécessitent une plus grande précision. Des mesures d'émission acoustique sont également réalisées en utilisant une chaîne d'émission LOCAN AT. Les essais sur tubes en pression interne croissante et en fatigue dynamique avec effet de fond sont assurés par un groupe hydraulique permettant de pressuriser les tubes sous eau, avec une rampe de montée en pression de 20 bar/min. pour les essais monotones, et une fréquence de cyclage de 25 cycles/min. pour les essais dynamiques.

#### **3.2. Résultats expérimentaux**

Des essais de calibration des capteurs résistifs en traction monoaxiale parallèlement aux mèches de carbone réalisés sur éprouvettes fournissent les courbes caractéristiques  $\Delta R/\varepsilon$  correspondant aux différents types de mèches [Tamiatto, 98]. Pour instrumenter une pièce de manière à ce qu'une réponse électrique significative du capteur intervienne lors des premiers endommagements critiques de la structure hôte contrôlée, il convient de connaître préalablement les niveaux de déformation correspondant aux endommagements critiques du matériau. Pour les tubes considérés, compte tenu des sollicitations exercées sur la pièce (pression interne avec effets de fond), les premiers endommagements correspondent aux coudes des courbes contrainte/déformation, qui interviennent pour une déformation axiale de 0,16 % et une déformation circonférentielle de 0,54 % Le meilleur choix d'instrumentation consiste par conséquent à utiliser une mèche de carbone d'allongement à la rupture nominale de 0,36 % (dont la

réponse électrique due aux ruptures de fibres a lieu pour une déformation de 0,45 % lors des essais sur éprouvettes en traction) placée en position circonférentielle.

La figure 3 présente les lois de comportement instantané contrainte/déformation axiales et circonférentielles ainsi que l'évolution de la résistance électrique de la mèche de carbone circonférentielle. L'augmentation brusque de la résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone intervient pour une déformation de 0,50 %, soit pour un niveau de pression précédant juste les premiers endommagements du matériau. Le capteur joue donc son rôle de capteur préventif de l'endommagement global de la pièce composite instrumentée. Le capteur réagit en outre bien avant le perlage (perte d'étanchéité des parois du tube) qui se produit pour une déformation de 1,05 %, ce qui permet à l'utilisateur d'intervenir avant la ruine finale de la pièce.

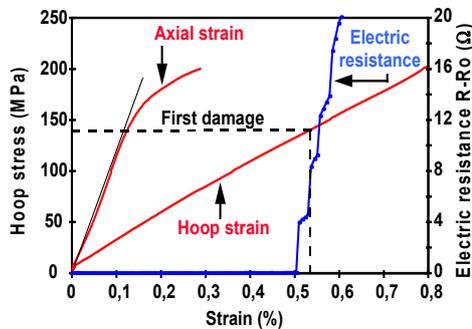


Fig.3: Tube sous pression interne croissante - Réponse d'un capteur fibre de carbone (0,36% d'allongement à la rupture) circonférentiel

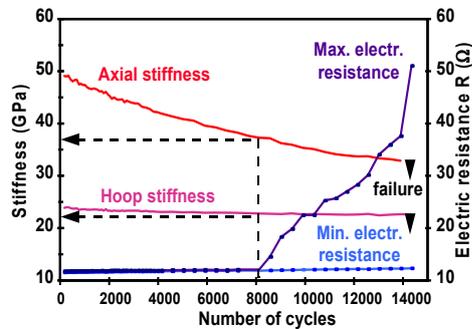


Fig.4: Tube sous pression interne dynamique - Réponse d'un capteur fibre de carbone (0,36% d'allongement à la rupture) circonférentiel

Dans un second temps pour simuler une utilisation intensive du tube à long terme à un niveau de sollicitation proche de l'endommagement critique de la structure, des essais de fatigue sont réalisés à amplitude de contrainte imposée, la pression maximale imposée étant inférieure de 20 % à la contrainte aux coudes des courbes de comportement en pression interne croissante. Sur la figure 4 sont présentées les courbes des résistances électriques maximales et minimales correspondant respectivement aux réponses du capteur lorsque la contrainte est maximale et lorsqu'elle s'annule sur un cycle. Les résultats montrent qu'après 8 200 cycles le capteur d'endommagement réagit, tandis que le perlage du tube n'intervient qu'au bout de 14 000 cycles. Lors de cette première réponse électrique la déformation circonférentielle du tube est alors de 0,50 %, valeur analogue à celle trouvée lors des essais d'éclatements instantanés et proche de celle déterminée sur éprouvette (0,45 %). Le cyclage n'affecte donc pas le seuil de déformation à partir duquel intervient l'augmentation de résistance électrique du capteur. Les essais de fatigue sur tubes démontrent ainsi la possibilité pour les capteurs de contrôler l'état d'endommagement des tubes et de générer un signal préventif, alors que la structure est soumise à des contraintes cycliques, sollicitations qui simulent, sur un temps limité, l'action à long terme des contraintes supportées par le tube en conditions réelles d'utilisation.

### 3.3. Modélisation de la réponse électrique des capteurs

L'objectif concret est de déterminer le traitement mathématique nécessaire pour relier l'augmentation de la résistance électrique de la mèche de carbone à sa déformation, donc passer d'une information électrique à une donnée mécanique sur le matériau, et ainsi concevoir un code de calcul servant à suivre en temps réel l'évolution de l'endommagement du matériau instrumenté. La modélisation de l'augmentation de résistance due à l'allongement des fibres de carbone repose sur l'hypothèse que les fibres de carbone subissent la même déformation longitudinale  $\varepsilon$  que le composite. En prenant en compte l'effet de coefficient de Poisson  $\nu$  des fibres de carbone, la variation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres  $\Delta R_e$  est alors directement reliée à la déformation subie  $\varepsilon$  et à la résistance électrique initiale  $R_0$  de la partie de la mèche de carbone qui subit l'élongation selon l'équation (4). La modélisation de l'augmentation de résistance due à la rupture des fibres de carbone  $a$ , quant à elle, été réalisée en utilisant des fonctions statistiques, d'une part de type Weibull à 3 paramètres (équation 5), d'autre part, de type sigmoïde (équation 6). La différence essentielle entre les deux modèles est la prise en compte (sigmoïde) ou pas (Weibull) de plusieurs ruptures par filament de carbone, sachant que le détail des hypothèses et des calculs est présenté dans la référence [Tamiatto et al., 99].

$$\Delta R_e = R_0 \varepsilon (1+2 \nu) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [\theta(\varepsilon)]^{1/m} + \varepsilon_s = \varepsilon_0 \left[ -\frac{1}{L} \ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \right) \right] \right]^{1/m} + \varepsilon_s \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[ -\ln \left( 1 - \frac{\theta(\varepsilon)}{A} \right) \right]^{1/m} + \varepsilon_s = \varepsilon_0 \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{LA} \ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \right) \right] \right) \right]^{1/m} + \varepsilon_s \quad (6)$$

avec  $\varepsilon_0$  : paramètre d'échelle;  $L$  : longueur de la fibre  
 $m$  : paramètre de forme  $A$  : coefficient empirique  
 $\varepsilon_s$  : minimum de localisation (déformation seuil pour laquelle la probabilité de rupture des fibres est encore nulle)

La valeur  $\varepsilon_s$  est donnée par la déformation correspondant aux premières ruptures de fibres de la mèche de carbone, déterminées expérimentalement à partir de l'amplitude des signaux d'émission acoustique. Les autres coefficients sont calculés suivant la méthode des moindres carrés. Les résultats obtenus sont présentés figure 6.

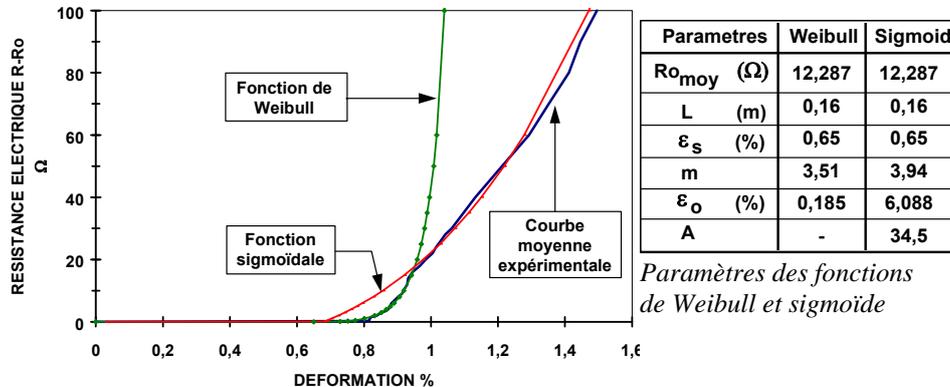


Fig.6. Comparaison expérience/calcul pour des essais de traction sur éprouvettes (mèche de carbone de 0,6% d'allongement à la rupture nominal)

La validation expérimentale des modèles a été réalisée de la même manière sur une pièce industrielle (tube sous pression interne, [Tamiatto et al. 99]). On montre ainsi que simplement à partir de la mesure de résistance électrique, l'utilisateur est en mesure de savoir si la structure est endommagée ou non. La seconde partie de cette étude a donc permis de valider les capteurs résistifs d'endommagement développés sur des pièces industrielles simples et de modéliser leur réponse électrique, ce qui permet ainsi de déterminer en temps réel pour une pièce instrumentée sous chargement multiaxial, si le seuil de premier endommagement est dépassé ou non. Il reste dans l'avenir à développer la méthodologie utilisée pour des pièces de géométrie plus complexe.

#### 4. Perspectives

L'ensemble des résultats déjà obtenus permet d'envisager, au-delà de la maîtrise couplée, déjà innovante, de l'élaboration et de l'utilisation, la mise en place d'un système de conduite intelligent adaptant les paramètres du procédé pour obtenir des performances maximales, tant pour ce qui concerne le procédé (temps de cycle minimum par exemple) que le produit fabriqué (réduction des défauts, ...).

#### 5. Bibliographie

- [Schwab et al.,96] Schwab S.D. et al., *Polymer Composites*, **17**, 2, 1996, 312-316
- [Wang et al.,98] Wang X. et al., *Smart. Mater. Struct.*, **17**, 1998, 121-127
- [Motogi et al.,99] Motogi S. et al., *CDROM Proc. ICCM12*, Paris, 5-9 July 1999
- [Parnas et al.,99] Parnas R.S. et al., *CDROM Proc. ICCM12*, Paris, 5-9 July 1999
- [Walsh,99] Walsh S.M. and Mohan R.V., *Plastics Engineering*, Oct. 1999, 29-32
- [Tamiatto,98] Tamiatto C., Thèse de Doctorat, Lille I/Ecole des Mines de Douai, 1998
- [Tamiatto C. et al.99], Tamiatto C. et al., *CDROM Proc. ICCM12*, Paris, 5-9 July 1999