

INTERETS TRIBOLOGIQUES DE LA NITROCARBURATION VIS-A-VIS DE LA CARBONITRURATION POUR DES CONTACTS ACIER/ACIER

P.F. CARDEY, A. FLEURENTIN

Pôle matériaux métalliques et surfaces, CETIM, Senlis

Sur le marché français du traitement thermo-chimique, la carbonituration représente aujourd'hui près de 80% de part de marché alors que la nitrocarburation n'occupe que 4%. Grâce aux importants développements des procédés proposés par les applicateurs, certains secteurs industriels commencent à envisager la substitution de la carbonituration par la nitrocarburation pour certaines pièces de frottement et d'usure. Cependant, ce type de démarche reste rare et la plupart des industriels préfère s'appuyer sur des solutions standards carbonitrurées au dépend de la nitrocarburation.

Une étude, menée par le CETIM, a permis de confirmer le fort intérêt de la nitrocarburation vis-à-vis de la carbonituration d'un point de vue tribologique.

Pour ce faire, différents traitements thermo-chimiques ont été testés :

- une carbonituration (Profondeur : 0.64 mm à 650HV),
- 3 nitrocarburations avec des morphologies de couches de combinaison (couches blanches) différentes (voir caractéristiques des nitrocarburations 1, 2 et 3 dans le Tableau 1).

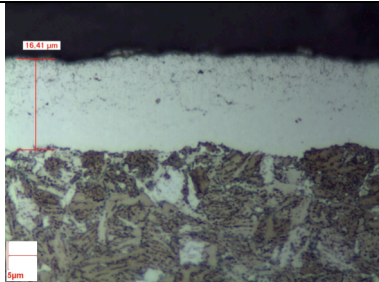
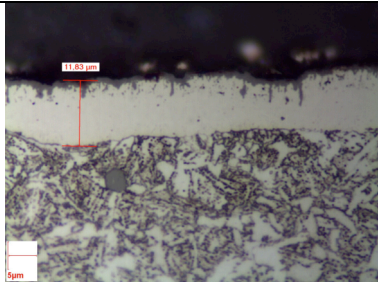
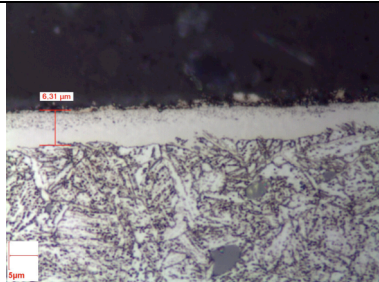
	NITROCARBURATION 1	NITROCARBURATION 2	NITROCARBURATION 3
			
Couche de combinaison (mesures des épaisseurs par diffraction de rayons X) :			
Fe_3O_4	0,5 μm	4,7 μm	-
ϵ	18 μm	10,6 μm	2,8 μm
γ'	3,7 μm	1,6 μm	3,3 μm
	Porosité globulaire	Porosité colonnaire	Porosité globulaire
Couche de diffusion - Profondeur normalisée ($HV_{cœur} + 100$) :			
	0,32 mm	0,31 mm	0,26 mm

Tableau 1 : Caractéristiques métallurgiques des nitrocarburations

L'acier traité est un 27MnCr5. Cette nuance couramment utilisée dans l'industrie automobile à l'état carbonitruré a volontairement été choisie pour cette étude comparative afin de montrer l'intérêt de la « solution nitrocarburation » sans impacter le coût matière.

La comparaison de ces 4 traitements a été réalisée sur les bancs d'essais tribologiques des laboratoires de HEF et du CETIM, dans différentes configurations (vitesse, pression, température, lubrification...) représentatives de cas concrets de l'industrie. Les premières conclusions tirées de ces essais sont proposées dans les chapitres qui suivent.

Utilisation en contact lubrifié

Des essais simulant le frottement dent sur dent dans les engrenages ou les pignons ont été menés au CETIM sur un tribomètre Plint TE-77. Ce moyen d'essai permet le frottement alternatif d'un pion sur une plaque bombée (contact cylindre sur cylindre croisé). Le pion et la plaque sont traités à l'identique (carbonitruration ou nitrocarburation). Les conditions d'essais sont décrites dans la Figure 1.

Les résultats des essais du contact lubrifié acier/acier montrent que le coefficient de frottement peut être amélioré de 10 à 40% lorsque l'acier est nitrocarburé plutôt que carbonitruré (voir Figure 1).

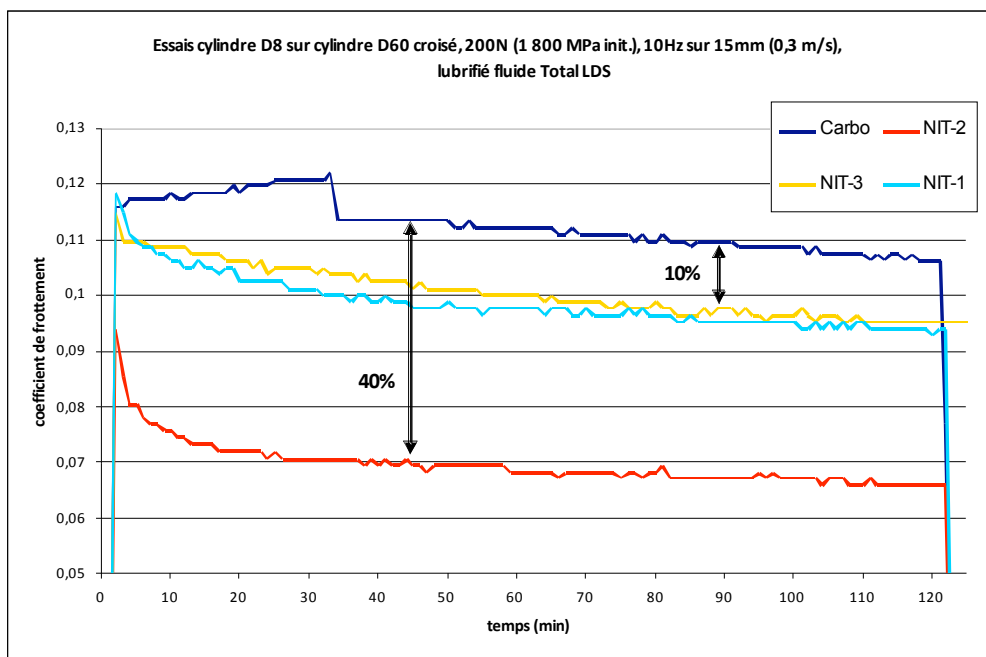


Figure 1 : Evolution du coefficient de frottement du contact lubrifié 27MnCr5/27MnCr5 selon le traitement thermo-chimique réalisé - Essai CETIM

En plus d'un comportement en frottement supérieur, le traitement de nitrocarburation permet d'améliorer la tenue à l'usure de l'acier par rapport à une carbonitruration. En effet, sur des essais en contact lubrifié, on obtient jusqu'à 70% de réduction du volume d'usure (voir Figure 2).

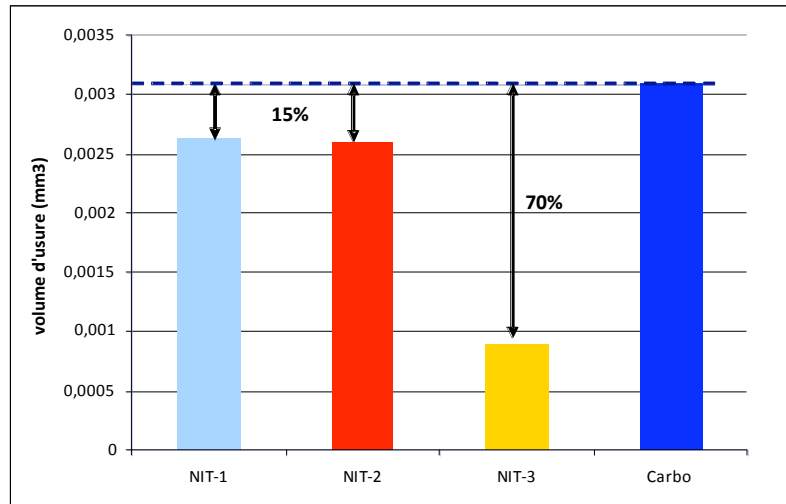


Figure 2 : Usure du pion en fonction du traitement thermochimique (27MnCr5/27MnCr5 lubrifié) - Essai CETIM

Selon la littérature, la couche de combinaison, constituée de nitrures de fer, confère à l'acier nitrocarbure des propriétés tribologiques supérieures. Certains auteurs privilégient l'obtention de nitrures de type ϵ (de structure hexagonale-compacte) pour ses meilleures propriétés de frottement par rapport aux couches de type γ' (de structure cubique face centrée), cette orientation technique n'est, cependant, pas admise de façon unanime.

La présente étude met plutôt en avant l'importance de la morphologie de la couche de combinaison, et en particulier sa porosité et son épaisseur. En effet, une couche dense permet d'améliorer sa cohésion. De plus, une couche de combinaison de faible épaisseur augmente son adhérence avec le substrat. Ces deux facteurs permettent une amélioration de la tenue à l'usure. C'est le cas de la nitrocarburation n°3 (Figure 2). Inversement, la tenue à l'usure des nitrocarburations n°1 et n°2 est moins bonne (mais supérieure à celle de la carbonituration) du fait d'une épaisseur de couche de combinaison plus importante (et, peut être, une porosité plus importante).

En revanche, le meilleur comportement en frottement de la nitrocarburation n°2 (voir Figure 1) peut s'expliquer par sa porosité « colonnaire » qui permet d'offrir une réserve de lubrifiant beaucoup plus efficace que les porosités « globulaires » des nitrocarburation n°1 et n°3.

Les mesures de résistance électrique réalisées au cours des essais de frottement (Figure 3) montrent parfaitement la meilleure stabilité du film de lubrifiant dans le cas de la nitrocarburation n°2 possédant une porosité « colonnaire ».

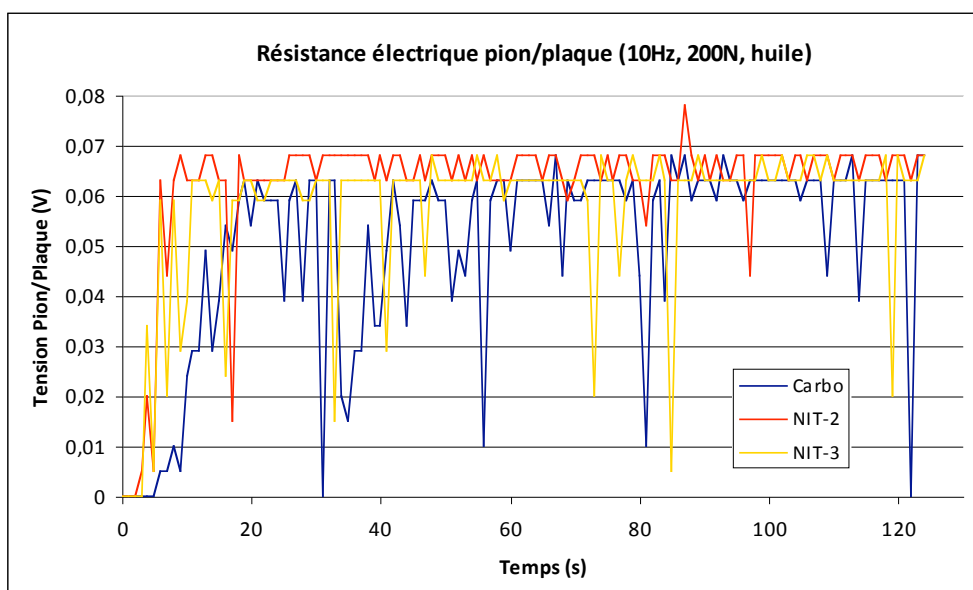


Figure 3 : Résistance électrique entre le pion et la plaque lors de l'essai de frottement en contact lubrifié ¹ - Essai CETIM

L'influence de la porosité sur la stabilité du film de lubrifiant (sur le régime de lubrification) a été confirmée par un second essai réalisé au laboratoire tribologique du groupe HEF en simulant le frottement came/poussoir.

Le protocole mis en place sur un tribomètre bague/plan consiste à réaliser des montées en charge de 5 à 200 daN (soit une pression de contact maximale de 700 MPa) à différentes vitesses : 1 000, 700 et 400 tr/min. Ce protocole (voir Figure 4), réalisé à trois reprises, est suivi d'une usure à 200 daN et 400 tr/min afin de recommencer le cycle des montées en charge à différentes épaisseurs. La durée totale de l'essai est de 15 heures. L'objectif de cet essai est d'obtenir différents points de la courbe de Stribeck (voir Figure 5). Le contact est lubrifié avec une huile 5W30 chauffée à 100°C. La bague en rotation est en 100Cr6 (trempé revenu) et le diamètre extérieur frotte sur une plaquette en 27MnCr5 traité (nitrocarburation ou carbonituration).

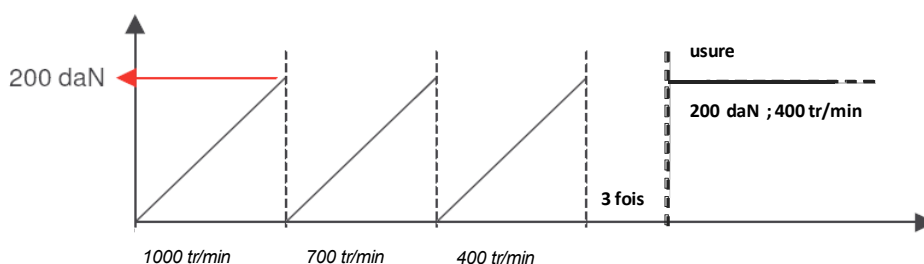


Figure 4 : Protocole de l'essai HEF bague/plan

¹ La mesure de résistance électrique lors d'un essai lubrifié permet de rendre compte de la stabilité du film de lubrifiant. Les chutes de tension correspondent à un contact direct entre le pion et la plaque. Cette mesure n'a pas pu être réalisée lors des essais avec la nitrocarburation n°1.

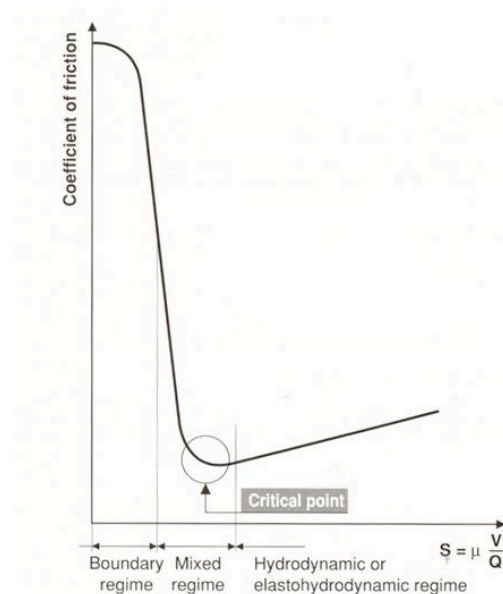


Figure 5 : Exemple de courbe de Stribeck avec les différents régimes de lubrification (avec μ la viscosité du lubrifiant, V la vitesse de frottement et Q la pression de contact)

Les résultats des essais sont décrits dans le Tableau 2.

	Nombre d'essais	Essais avec grippage	Conditions de grippage	Durée de l'essai	Usure finale sans grippage
Carbonituration	3	3	<ul style="list-style-type: none"> ▫ 1 000 tr/min – 158 daN ▫ 1 000 tr/min – 167 daN ▫ 1 000 tr/min – 166 daN 	<ul style="list-style-type: none"> → 5 min 16 s → 5 min 34 s → 5 min 32 s 	-
Nitrocarburation n°1	3	2	<ul style="list-style-type: none"> ▫ 700 tr/min – 48 daN ▫ 700 tr/min – 180 daN 	<ul style="list-style-type: none"> → 8 min 6 s → 51 min 30 s 	<ul style="list-style-type: none"> 32 μm → couche de diffusion
Nitrocarburation n°2	3	1	<ul style="list-style-type: none"> ▫ 400 tr/min – 200 daN <p><i>Dans la couche compacte</i></p>	→ 6 h 30 min	<ul style="list-style-type: none"> 22 et 24 μm → couche de diffusion
Nitrocarburation n°3	2	1	<ul style="list-style-type: none"> ▫ 700 tr/min – 140 daN 	→ 11 min 10 s	<ul style="list-style-type: none"> 19 μm → couche de diffusion

Tableau 2 : Résultats des essais de caractérisation des différents régimes de lubrification du contact 27MnCr5 / 100Cr6 – Essai HEF

On remarque que pour les conditions de vitesses et de pressions testées, la carbonituration atteint très rapidement le régime mixte ou critique, synonyme de contacts métal/métal multiples pouvant aboutir à un phénomène d'adhésion / grippage (voir Figure 6). Les conditions de grippage pour les nitrocarburations sont beaucoup plus sévères, ce qui signifie que le comportement élastohydrodynamique est maintenu plus longtemps pour les surfaces nitrocarburees. On remarque également le meilleur comportement de la nitrocarburation n°2 (porosité colonnaire) pour laquelle le phénomène d'adhésion grippage est le plus rare, et pour les conditions les plus sévères (faible vitesse, charge élevée). Ce résultat confirme le rôle de la porosité sur le régime de lubrification et, donc, sur le comportement en frottement.

Pour les essais sans grippage (Figure 7), la profondeur d'usure mesurée révèle que le contact final se produit au niveau de la couche de diffusion. Nous n'avons pas observé d'élévation sensible du coefficient de frottement. D'après ce constat, la couche de diffusion d'un acier nitrocarburé aurait un comportement tribologique supérieur à celui d'une couche carbonitrurée. *Ce constat est hypothétique et reste à confirmer lors d'éventuels essais complémentaires en 2010.*

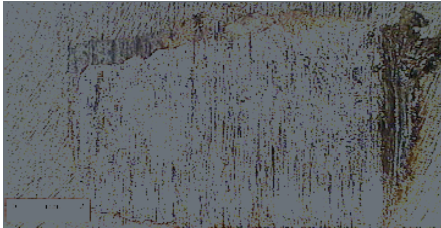


Figure 6 : Carbonitruration : grippage à 1 000 tr/min et 167daN – *Essai HEF*

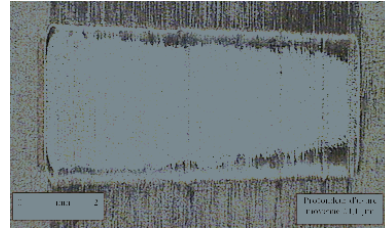


Figure 7 : Nitrocarbururation : montée en charge de 0 à 200 daN à 1 000, 700 et 400 tr/min sans grippage - *Essai HEF*

Utilisation à sec

Les essais CETIM sur le tribomètre Plint TE-77 (décrit précédemment pour les essais lubrifiés) ont également été réalisés à sec pour un contact acier/acier, traité à l'identique.

Les essais à sec (Figure 8) ont montré que le coefficient de frottement des couches nitrocarburées devient équivalent à celui des couches carbonitrurées après 4 150 cycles (soit 7 min). En effet, en l'absence de lubrification, l'usure totale de la couche de combinaison est rapide et le frottement se fait au niveau de la couche de diffusion. Le comportement est alors sensiblement équivalent au frottement de deux couches carbonitrurées.

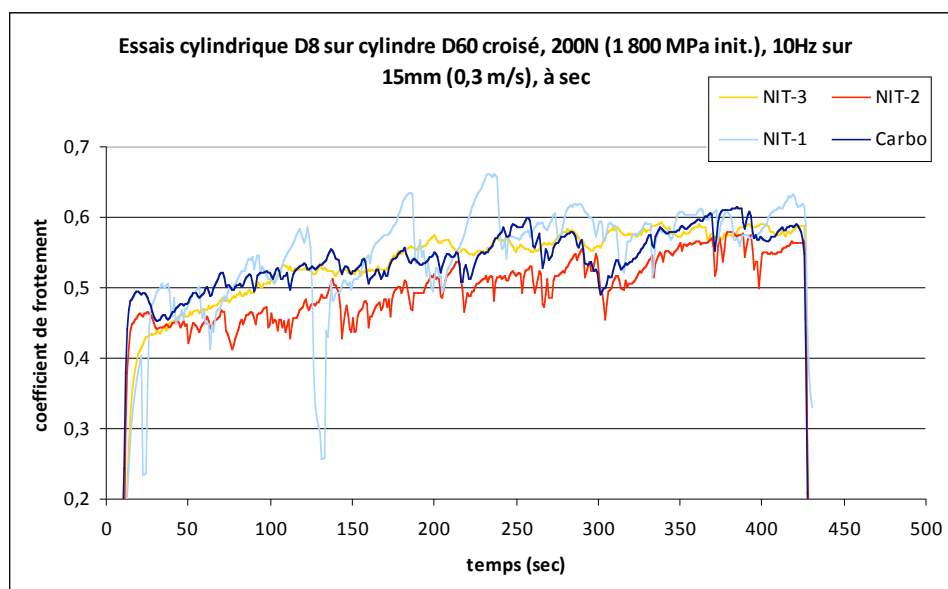


Figure 8 : Evolution du coefficient de frottement du contact non lubrifié 27MnCr5/27MnCr5 selon le traitement thermochimique réalisé - *Essai CETIM*

En revanche, lors des 1 000 premiers cycles, lorsque le contact se fait encore au niveau de la couche de combinaison, la nitrocarburation permet un gain d'environ 15% du coefficient de frottement par rapport à la carbonitruration (Figure 9).

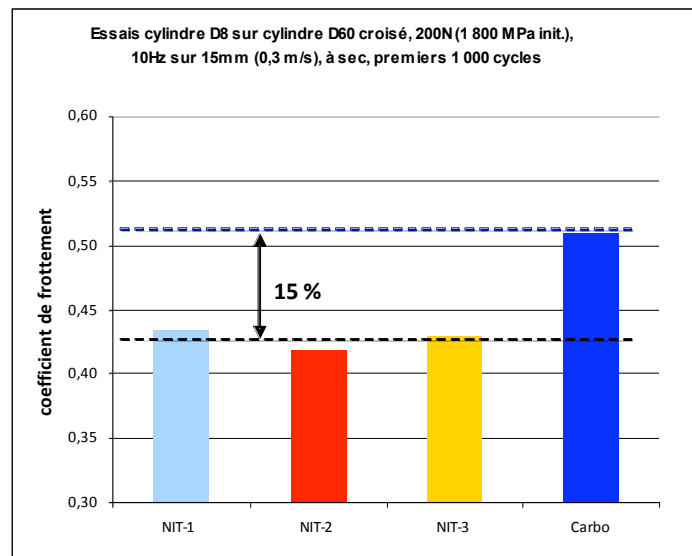


Figure 9 : Coefficient de frottement du contact non lubrifié 27MnCr5/27MnCr5 à 1 000 cycles selon le traitement thermochimique réalisé - Essai CETIM

L'influence bénéfique de la porosité, démontrée lors des essais lubrifiés, n'est évidemment plus visible en l'absence de lubrification. On peut donc attribuer ce gain à la nature même de la couche de combinaison et de l'intérêt qui en découle d'un contact céramique/céramique ou céramique/métal par rapport à un contact métal/métal.

Conclusion

Pour les contacts acier/acier utilisés en présence de lubrification, les solutions nitrocarburees présentent un comportement en frottement (de 10 à 40%) et une tenue à l'usure (jusqu'à 70%) supérieurs aux solutions carbonitrurées. Les deux paramètres influant sur le comportement tribologique sont :

- la morphologie de la couche de combinaison (porosité, épaisseur, ...),
- et le passage d'un contact métal/métal à un contact métal/céramique (ϵ ou γ').

A sec, le comportement entre les deux traitements devient rapidement identique lorsque l'usure de la couche de combinaison est totale. Cependant, on peut espérer un meilleur comportement de la nitrocarburation sous de faibles charges en augmentant la durée de vie de la couche blanche.

Concernant la couche d'oxyde, présente essentiellement sur la nitrocarburation 2, nos essais ne nous ont pas permis de mettre en évidence la prédominance de ce paramètre lors des frottements à sec ou lubrifiés.

Compte tenu des résultats intéressants obtenus au travers de cette étude, le CETIM souhaite poursuivre son action en réalisant le même type d'essai à des pressions plus faibles. Ce qui permettrait de dissocier encore d'avantage les comportements en frottement de surfaces carbonitrurées et nitrocarburees.

Les conclusions issues de cette étude ne s'appliquent que pour les géométries et conditions de contact définies préalablement. La transposition de ces résultats pour des géométries ou des applications différentes mérite certaines vérifications. Tout industriel intéressé pour transposer ces résultats à ses propres configurations de contact pourra se faire accompagner par le CETIM.

Remerciements

Nous tenons à adresser nos remerciements aux industriels et universitaires qui se sont investis pour mener à bien cette étude : Mlle Andreux et Mr Jacquot de BODYCOTE, Mr Chen du CETIM, Mr Chavanne et Mr Villard du groupe HEF, Mr Fischer, Mr Graissaguel et Mr Hisler de JTEKT, Mr Warter de Metatherm, Mr Progri et Mr Robbe-Valloire de SUPMECA ainsi que Mr Chomer et Mr Jacomet de Thermi Lyon.