

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

| | |
|--|----|
| <i>I.1 Introduction.</i> | 23 |
| <i>I.2 Les sollicitations subies pendant le contact.</i> | 24 |
| I.2.1 Le contact lisse. | 25 |
| I.2.2 Le contact non-lisse. | 27 |
| <i>I.3 L'endommagement.</i> | 31 |
| I.3.1 Fatigue de roulement initiée en sous-couche. | 31 |
| I.3.2 Fatigue de roulement initiée au voisinage des rugosités. | 33 |
| I.3.3 Fatigue de roulement initiée au voisinage des indents. | 33 |
| I.3.4 Bilan. | 34 |
| <i>I.4 Le matériau sollicité, le 32CrMoV13 nitruré.</i> | 36 |
| I.4.1 Le traitement thermo-chimique de nitruration. | 36 |
| I.4.2 Microstructure résultant du traitement de nitruration. | 38 |
| I.4.3 Propriétés mécaniques du 32CrMoV13 nitruré. | 41 |
| <i>I.5 Bilan.</i> | 44 |

I.1 INTRODUCTION.

Le roulement est un organe mécanique chargé de permettre la rotation entre deux arbres ou entre un arbre et un logement dans de bonnes conditions de guidage et avec peu de déperdition énergétique. La rotation est permise par des corps roulants (1), séparés par une cage (2), qui roulent sur les bagues intérieures (3) et extérieures (4). La charge appliquée sur le roulement peut être axiale ou radiale, et de nombreuses géométries de bagues et de corps roulants existent en fonction de la nature des efforts à transmettre.

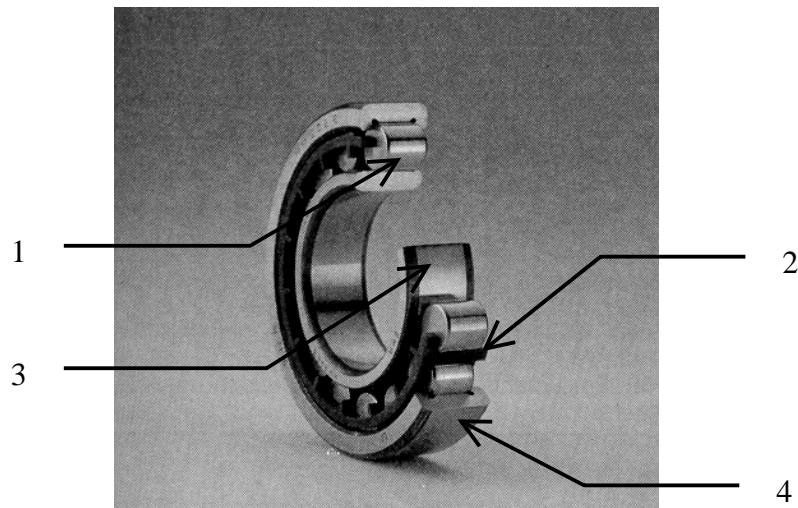


Figure I.1. Roulement à rouleaux cylindriques type NU ; SNR Roulements.

L'endommagement en fatigue de roulement est provoqué par le passage répété des corps roulants sur les pistes de roulement. Au terme d'une longue période d'incubation, des micro-écailles (plusieurs centaines de milliers de cycles) ou des écailles (plusieurs millions de cycles) peuvent apparaître, conduisant, lors de leur développement, à la ruine du roulement.

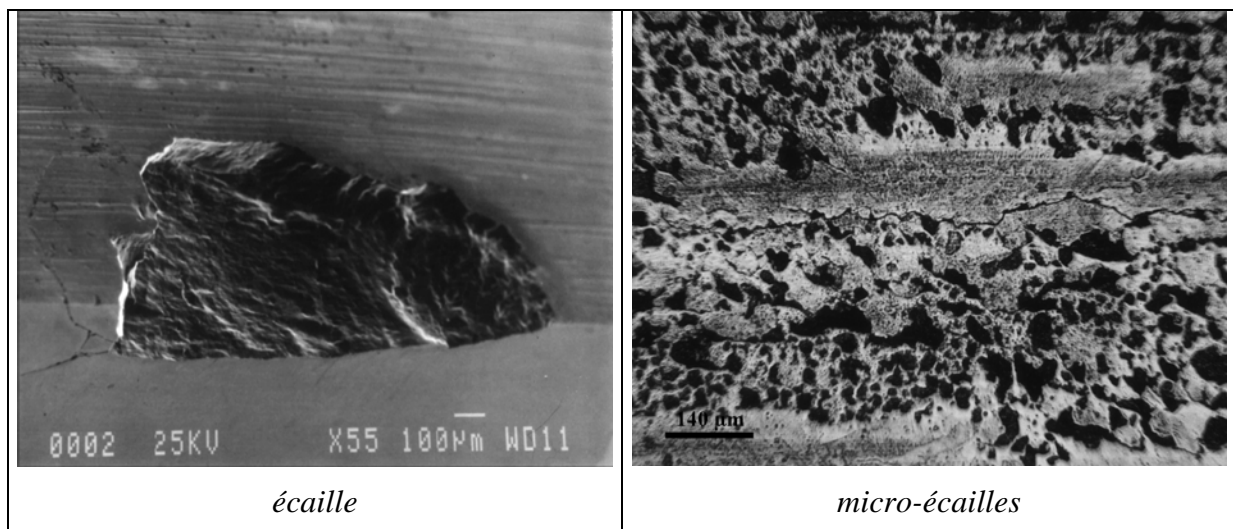


Figure I.2. Avaries dues à la fatigue de roulement [56].

Après avoir identifié les mécanismes mis en jeu lors de la fatigue de roulement et pour mieux comprendre les phénomènes qui sont à son origine, il est nécessaire de s'intéresser au contact entre le corps roulant et la piste, afin de déterminer les sollicitations engendrées durant le contact. La connaissance de ces sollicitations permet alors, dans un certain nombre de cas,

de modéliser les mécanismes d'endommagement à partir du niveau de sollicitation et de la connaissance des caractéristiques du matériau.

I.2 LES SOLLICITATIONS SUBIES PENDANT LE CONTACT.

Dans un roulement, la charge est transmise par les contacts entre les éléments roulants et les bagues. Ces éléments présentent des rayons de courbure très différents. Suivant la valeur de la différence des courbures, on parle de contact plus ou moins conforme (figure I.3). Dans les roulements, la zone de contact est faible, et les pressions élevées s'établissant à l'interface déforment les surfaces. Pour déterminer la répartition de pression en surface et les contraintes dans les éléments en contact, il est alors nécessaire de prendre en compte la déformation de ces derniers.

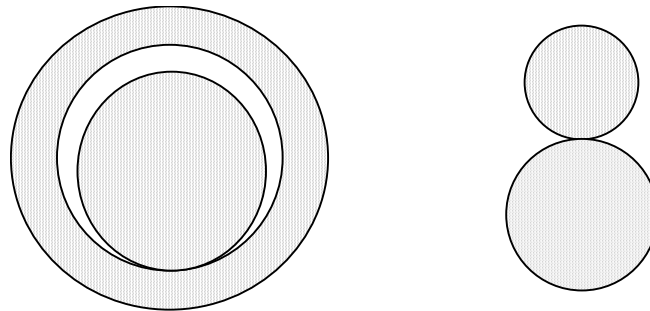


Figure I.3. Contact conforme et contact non conforme.

D'un point de vue cinématique, les deux corps en contact n'ont pas toujours et partout la même vitesse linéaire dans la zone de contact. Il y a donc, en plus du roulement une part de glissement. Le sens du roulement est donné par le sens des vitesses linéaires des corps en contact. En glissement, si on considère la surface lente, la force de frottement est orientée dans le sens du roulement ; la surface rapide tire la surface lente. A l'inverse, sur la surface rapide, le frottement est opposé à la direction du roulement ; la surface lente retient la surface rapide.

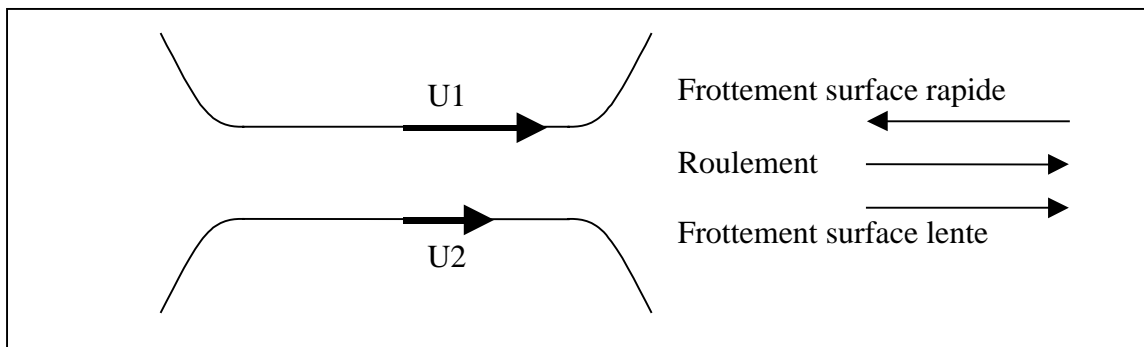


Figure I.4. Cinématique du contact.

Lorsque les zones de contact sont petites au regard des rayons de courbure (contact non conforme) et des dimensions des corps roulants, le comportement des corps en contact peut être assimilé à celui de massifs semi-infinis, en ce qui concerne les déformations en surface et les sollicitations subies.

Les roulements sont réalisés dans des matériaux particulièrement durs (aciers à roulement ou céramique). Dans ce type d'application, il est établi et vérifié que les déformations des massifs en contact sont petites.

I.2.1 LE CONTACT LISSE.

Les premières solutions du problème de contact non conforme ont été établies en considérant que les surfaces en regard sont exemptes de tout défaut et parfaitement lisses.

a) Le contact sec.

Le problème du contact élastique normal entre deux ellipsoïdes a été résolu par Hertz en 1882 [37]. La zone de contact est elliptique, et la répartition de la pression dans le contact parabolique. La pression de Hertz, pression maximale dans le contact est notée P_h . Nous donnons ci-dessous la solution pour le cas du contact entre deux sphères de rayon R_1 et R_2 , de caractéristiques élastiques E_1, ν_1 et E_2, ν_2 et soumises à une charge W . L'aire de contact est alors circulaire, de rayon a . Nous pouvons constater que l'aire de contact et la pression de Hertz dépendent de la géométrie équivalente du contact, définie par R_{eq} et du module d'Young équivalent, défini par E^* . Ainsi, la répartition des pressions de contact entre deux sphères de rayon $R_1 = 40$ mm et $R_2 = 10$ mm est identique à celle du contact entre deux sphères de rayon $R_1 = R_2 = 16$ mm, et à celle d'une sphère de 8 mm de rayon sur un plan.

Les contraintes subies par les massifs en contact peuvent être exprimées en fonction de la pression de Hertz et de la taille de l'aire de contact. Pour un contact circulaire, la contrainte de Tresca maximale vaut $0,31P_h$. Elle est atteinte à une profondeur égale à $0,48a$. Lorsque le rapport d'ellipticité du contact change et que l'on tend vers le cas du contact cylindrique, la contrainte maximale évolue peu, mais sa position en profondeur augmente (figure I.6).

Dans le domaine du roulement, les pressions de contact sont très élevées. Les pressions de Hertz rencontrées sur ces applications varient typiquement entre 1 et 4 GPa.

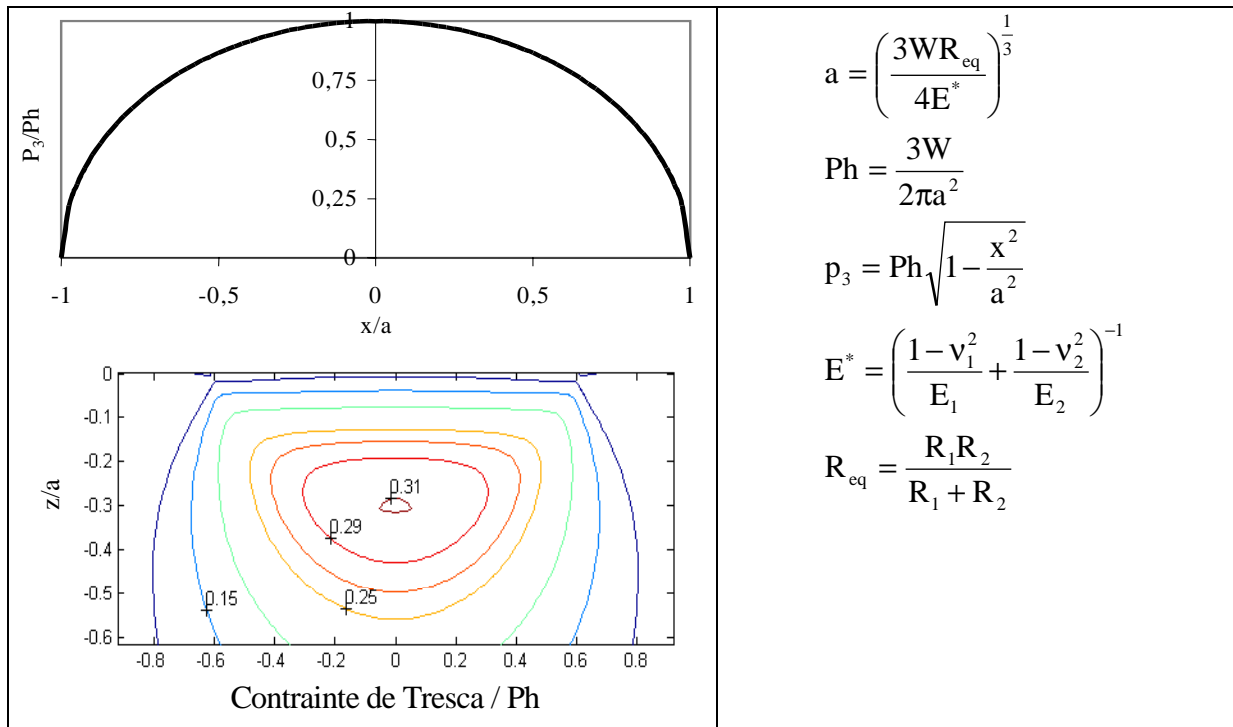


Figure I.5. Solution de Hertz pour un contact circulaire.

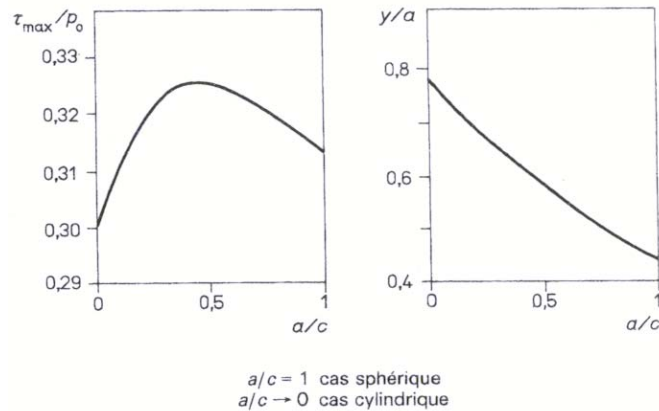


Figure I.6. Valeur et profondeur de la contrainte de cisaillement maximale en fonction du rapport des axes de l'ellipse de contact [27].

b) Le contact lubrifié.

Les roulements sont lubrifiés. En présence de lubrifiant, l'entrée du contact joue le rôle de convergent, dans lequel le lubrifiant est entraîné par le mouvement des corps en contact, créant ainsi un film d'huile qui sépare les surfaces. Les pressions de contact étant très élevées, l'huile qui sépare les corps en contact passe à l'état vitreux et déforme les surfaces. La théorie prenant en compte la déformation des surfaces ainsi que le comportement du fluide piézo-visqueux s'appelle l'élastohydrodynamique (EHD). Les solutions pour un contact cylindre/plan lisse ont été publiées par Dowson et Higginson en 1966 [17] et celles du contact ellipsoïde/plan par Hamrock et Dowson en 1976 [33, 34]. En terme de pression de contact, la différence par rapport au cas lisse se situe essentiellement dans l'existence d'un pic de pression à la sortie du contact.

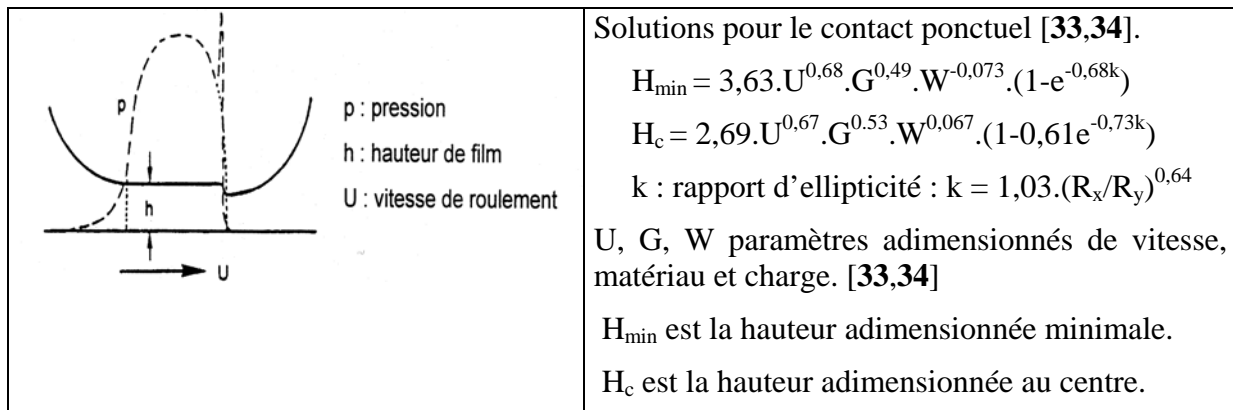


Figure I.7. Profil de pression et paramètres du contact EHD ellipsoïde plan.

Dowson et Higginson [17] montrent que lorsque le paramètre adimensionné de vitesse augmente, la contrainte de cisaillement maximale dans le massif, sous le contact, se rapproche de la surface (figure I.8). Cependant, la valeur de la sollicitation maximale est très peu affectée par la présence du lubrifiant, et pour les pressions de Hertz élevées, le champ de contraintes tend vers celui dû au contact sec.

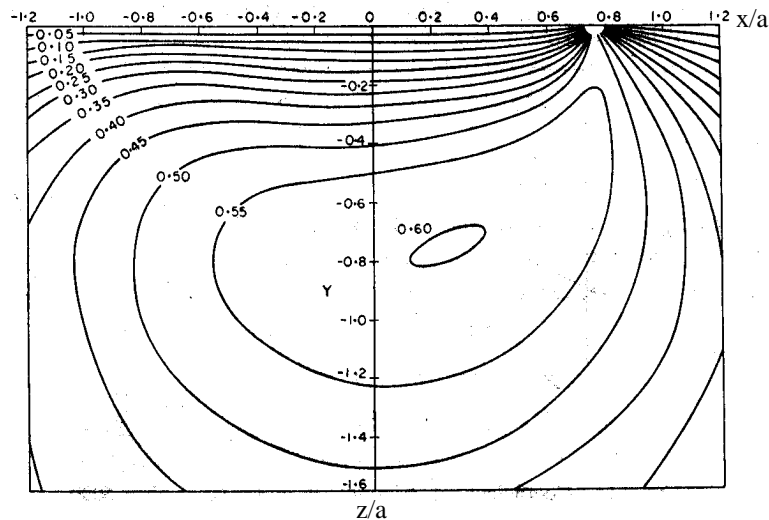


Figure I.8. Contrainte de cisaillement de Tresca adimensionnée par la pression de Hertz. Contact EHD cylindrique-plan [17].

I.2.2 LE CONTACT NON-LISSE.

Grâce aux formules précédentes, nous pouvons calculer l'épaisseur du film d'huile séparant les surfaces. Si l'on considère l'application étudiée par Dumont [18], à savoir deux sphères de 80 mm de diamètre tournant à 9549 tr/min (vitesse linéaire de 40 m.s^{-1}) en contact sous une charge de 2426 N ($P_h = 2,5 \text{ GPa}$) et lubrifiées par une huile aéronautique à 80°C (MIL-L-23699, viscosité de 5 cst à 100°C), la hauteur minimale du film d'huile vaut $h_{\min} = 0,275 \mu\text{m}$. Au regard de l'ordre de grandeur obtenu, il apparaît que les surfaces ne peuvent plus être considérées comme lisses, et que la micro-géométrie peut avoir une influence sur les sollicitations subies.

a) Le contact rugueux.

Lorsque les surfaces en regard sont imparfaites, des surpressions peuvent apparaître qui sollicitent les massifs en contact dans des zones proches de la surface. Si ces défauts de surface sont importants, le film d'huile peut être partiellement rompu, et des contacts métal-métal peuvent se produire.

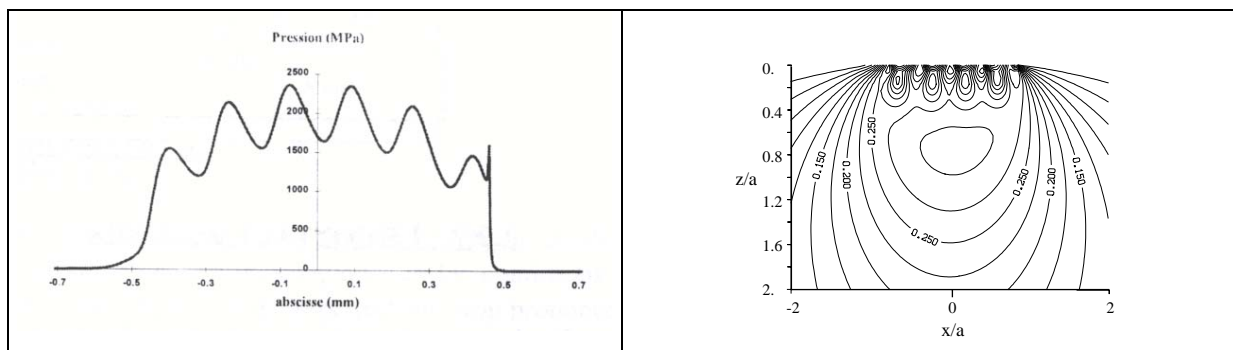


Figure I.9. Pression et contrainte de Von mises dans un contact rugueux. Contact EHD rugueux cylindre/plan[14, 18].

On distingue quatre régimes de lubrification [18].

Elastohydrodynamique.

La charge est transmise par le film de lubrifiant. Des aspérités peuvent exister en surface, mais leur hauteur est telle que les surpressions qu'elles engendrent sont négligeables. Le contact est lisse.

Micro-élastohydrodynamique.

La charge est transmise par le film de lubrifiant. Cependant, la micro-géométrie provoque des surcontraintes non négligeables.

Lubrification mixte.

Le film de lubrifiant est incomplet. Il peut y avoir contact direct entre les aspérités.

Lubrification limite.

L'épaisseur du film de lubrifiant est très faible. La charge est transmise principalement par les contacts directs entre les aspérités.

Le paramètre de sévérisation Λ , rapport entre la hauteur minimale du film élastohydrodynamique en contact lisse et la moyenne quadratique des hauteurs des rugosités, est un bon indicateur du régime de lubrification. La transition entre le régime élastohydrodynamique et le régime micro-élastohydrodynamique se situe autour de $\Lambda = 1$.

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{R_{\text{ms}}}$$

Dans le cas des roulements aéronautiques, les surfaces sont rectifiées très soigneusement (super finition), pour limiter au maximum les surpressions et les surcontraintes. Ils fonctionnent donc en régime élastohydrodynamique. Les surpressions induites par la rugosité des surfaces sont négligeables.

b) Le contact indenté.

En plus des rugosités, qui sont réparties sur l'ensemble des surfaces de contact, on rencontre également des défauts de surface plus localisés. Ce sont des marques présentes sur la piste de roulement et désignées par le terme indent, en raison de leur origine. Leur taille caractéristique est de 1 à 20 μm pour la profondeur et de 50 à 150 μm pour le rayon.

L'indentation.

Les indents peuvent avoir plusieurs origines. Il peut s'agir d'empreintes faites hors service, lors du transport, du montage ou au cours d'opérations de maintenance. La présence de ces marques peut être limitée par un contrôle rigoureux des pièces avant le montage, par des procédures de montage précautionneuses ainsi que par une sensibilisation des monteurs à ce problème. L'autre origine des indents résulte de la pollution des lubrifiants par des particules d'origines diverses. En effet, une huile, même neuve, transporte des particules en suspension provenant de sa fabrication et de son conditionnement. De plus, au cours du fonctionnement du roulement, les particules d'usure de l'ensemble du mécanisme sont susceptibles d'être transportées par le lubrifiant. Enfin, l'environnement extérieur est également susceptible d'être une source de pollution (sable dans un environnement désertique, ...). Lorsqu'une particule est présente dans le lubrifiant, elle peut être happée par le contact, même si sa taille est bien supérieure à l'épaisseur du film d'huile séparant les surfaces en contact. La particule est alors déformée ou cassée, et marque les surfaces de contact.

La résolution du contact entre corps roulants indentés est un problème complexe qui ne peut être traité dans le cadre de la théorie de l'élasticité. En effet, les massifs ont été déformés plastiquement lors du processus d'indentation. Ces déformations, qui créent la déformation permanente de la surface, génèrent également des contraintes résiduelles élevées [64], qu'il est nécessaire de prendre en compte pour déterminer les sollicitations réellement subies pendant le passage d'une charge sur l'indent. De plus, la plastification a modifié localement les caractéristiques du matériau par le phénomène d'écrouissage.

Notre objectif n'est pas de modéliser l'indentation d'une surface par une particule prise dans le contact mais d'étudier une situation voisine utilisée expérimentalement pour étudier l'effet d'indentations sur le comportement d'un roulement en assurant la reproductibilité des indents. Elle consiste à pratiquer des indentations artificielles Vickers ou Rockwell. Nous considérerons ici le cas de l'indentation contrôlée de type Rockwell (indenteur sphérique), plus facilement modélisable. Ceci permet d'avoir accès notamment aux contraintes résiduelles introduites lors de l'indentation et donc d'en tenir compte pour déterminer les sollicitations subies pendant le contact indenté.

Le contact indenté.

La présence d'un indent, défaut de surface, modifie la pression de contact et le champ de contraintes produit par le contact des massifs.

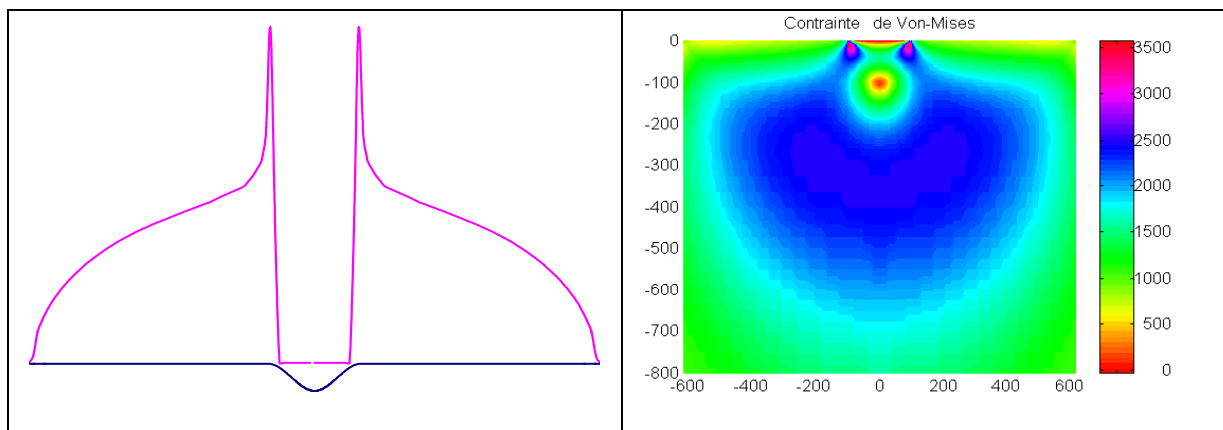


Figure I.10. Pression et contrainte de Von Mises dans un contact indenté sec.

La difficulté d'analyse du problème de contact dans de telles conditions a plusieurs origines. Tout d'abord, le problème ne peut être résolu que numériquement, et la discrétisation nécessaire à la résolution correcte du contact doit être affinée en raison de la faible dimension des défauts par rapport à celle du contact. De plus, la présence d'indents importants crée une zone de non-contact au centre de l'indent. La résolution de ce problème en EHD est extrêmement complexe et nécessite l'utilisation de codes prenant en compte la cavitation du lubrifiant dans la cavité formée au centre de l'indent. La résolution en contact sec permet cependant d'avoir une très bonne représentation des pressions de contact, surtout pour les indentations profondes.

Le contact indenté élastoplastique.

L'observation expérimentale de la géométrie d'un indent au cours d'un essai de fatigue montre que celle-ci évolue au cours des premiers cycles. Principalement, il est constaté que les bourrelets présents au voisinage de l'indent s'estompent, preuve que le massif indenté est plastifié au cours des premiers cycles. Des contraintes résiduelles supplémentaires, modifiant localement le champ de contraintes subi par le matériau indenté, sont alors générées et le matériau est à nouveau écroui, modifiant ainsi ses caractéristiques mécaniques. De plus, la géométrie des pièces en contact évoluant, les surpressions causées par l'indent sont modifiées.

Ainsi, la détermination des sollicitations subies pendant le contact indenté nécessite la résolution du contact élastoplastique. Le comportement élastoplastique dépend du trajet de chargement. Il est donc nécessaire de considérer successivement le processus d'indentation puis le déplacement (relatif) de l'indent dans le contact.

Plusieurs études ont été menées sur le contact élastoplastique lisse, rugueux ou indenté. Gupta et al [31], Hahn et al [32] et Xu et al [64] ont étudié le contact élastoplastique par éléments finis. Cependant, si on considère un contact indenté tridimensionnel, ce genre d'approche n'est pas envisageable, en raison de la lourdeur du maillage nécessaire à une description correcte du problème [16]. Lorsque le volume plastique est faible et que les déformations plastiques peuvent être considérées comme petites, les approches semi-analytiques semblent bien adaptées. Cependant, la plupart des auteurs restreignent le problème pour le simplifier. Ainsi, Hearle et Johnson [36] ne considèrent que les déformations plastiques de cisaillement. Dang Van et Maitournan [16] considèrent eux un problème stationnaire, ce qui ne permet pas de traiter le contact indenté à cause du roulement des corps en contact. Viraux et al [60] ont utilisé une méthode rapide pour évaluer le comportement élastoplastique du contact, mais ils ne considèrent ni la modification de la pression de contact ni le roulement. Enfin, Mayeur et al [45, 46] ont développé un modèle de contact normal semi-analytique basé sur les éléments frontières, sans simplification, mais le modèle est 2D et ne permet pas de traiter le cas du contact circulaire.

Bilan.

Dans la majorité des études, l'indent n'est représenté que par la perturbation de la géométrie de la surface et le contact est résolu élastiquement. Cette analyse permet de déterminer le champ de pression qui s'établit au niveau du contact lorsque la géométrie est rodée, c'est à dire après quelques cycles, lorsque le passage de la charge sur l'indent ne provoque plus de déformations plastiques. Il est évidemment nécessaire de considérer une géométrie représentative de cet état. Cependant, les contraintes calculées à partir de ces pressions de contact ne permettent pas, à elles seules, de déterminer les sollicitations subies puisque, ni les contraintes résiduelles générées pendant l'indentation, ni celles introduites pendant le rodage ne sont prises en compte. Xu et al [64] ont pris en compte l'ensemble du processus, à savoir indentation et passage de la charge, en résolvant le problème du contact élastoplastique 2D par éléments finis, permettant ainsi de mettre en évidence le rôle non négligeable des contraintes résiduelles sur les sollicitations subies dans un contact indenté.

I.3 L'ENDOMMAGEMENT.

La fatigue de roulement a des conséquences dangereuses pour le fonctionnement des dispositifs mécaniques qui contiennent des roulements car elle se traduit, dans son stade final, par la formation d'écailles ou de micro-écailles sur les corps en contact, ce qui détériore les performances du roulement et peut conduire au blocage de la rotation. Concernant les avaries provoquées par la fatigue de roulement, deux questions se posent :

- a) Jusqu'à quel niveau peut-on charger le contact sans risquer de provoquer d'avaries de fatigue (limite d'endurance) ?
- b) Si cette limite est dépassée, quel est le potentiel du mécanisme ; combien d'heures peut-il fonctionner avec un risque de défaillance limité (durée de vie) ?

La formation des écailles ou des micro-écailles s'opère en deux étapes successives, l'initiation et la propagation. L'initiation correspond au temps nécessaire à la nucléation de micro-fissures, et la propagation au temps nécessaire à leur développement jusqu'à l'avarie.

On peut classer les avaries rencontrées en fatigue de roulement en trois catégories, dépendant de leur origine et du site d'initiation. On distingue ainsi les avaries initiées en sous-couche de celles initiées en surface. Nous diviserons cette dernière catégorie en deux, en séparant les avaries initiées près des rugosités de celles initiées près des indents.

I.3.1 FATIGUE DE ROULEMENT INITIEE EN SOUS-COUCHE.

L'écailage dû à la propagation de fissures initiées autour d'inclusions est la principale cause d'avaries initiées en sous-couche.

Les transformations microstructurales visibles dans la zone de Hertz, où la contrainte de cisaillement est maximale, sont les premiers symptômes de l'endommagement en fatigue de roulement initié en sous-couche. Elles se produisent en premier lieu au voisinage d'inclusions qui jouent le rôle d'amplificateurs de contraintes. Les papillons de phase blanche (figure I.11), orientés à 45° par rapport au roulement, qui se forment dans les aciers martensitiques autour de ces inclusions sont dus au mouvement des dislocations générées par le dépassement local de la micro-limite d'élasticité. La multiplication de ces dislocations au cours des cycles successifs de chargement entraîne la formation de fissures dans les zones transformées lorsque la densité de dislocations atteint une valeur critique.

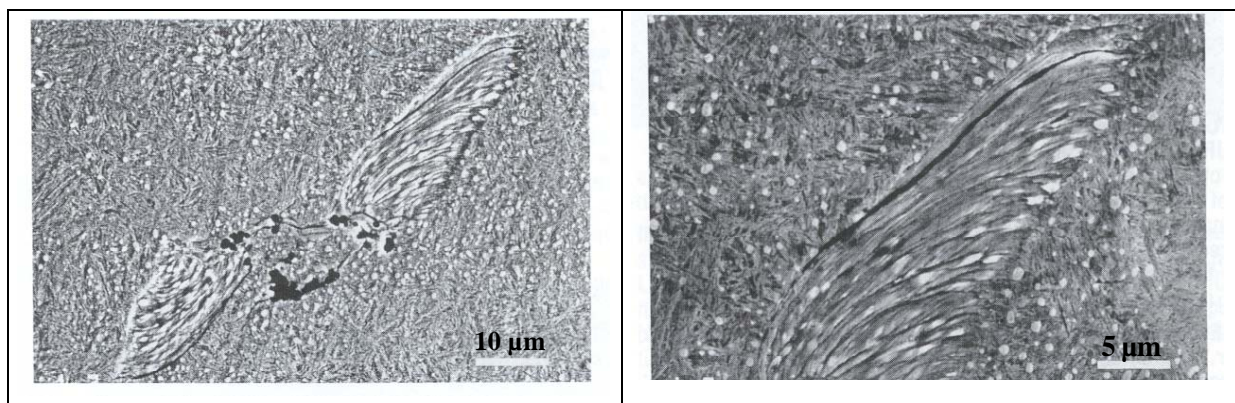


Figure I.11. Papillon et fissure amorcée autour d'une inclusion[53].

Si les contraintes de cisaillement sont suffisamment élevées, ces micro-fissures peuvent se propager jusqu'à la surface, et provoquer ainsi un écailage.

La détermination des sollicitations subies pendant le contact ne permet pas à elle seule ni de prédire, ni d'expliquer la formation des avaries de fatigue. Pour répondre à ces questions, des modèles de durée de vie ont été mis en place. Ils peuvent être scindés en deux familles, les modèles phénoménologiques et les modèles physiques.

Les modèles phénoménologiques actuels sont des évolutions des modèles de Weibull et de Lundberg et Palmgreen. Ils permettent de prédire la durée de vie des roulements, sans s'appuyer sur la description fine du mécanisme de formation des avaries. Ils sont basés sur une approche statistique des défaillances constatées expérimentalement et sur la notion d'un volume à risque engendré par le contact. Ainsi, le modèle de Ioannides Harris [35] exprime la probabilité de survie S en fonction du nombre de cycles N par :

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = \bar{A}N^e \int_V H(\sigma - \sigma_u) \cdot \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z^h} dV \quad \text{où}$$

\bar{A} , h , n et e sont des paramètres liés au matériau

σ_u est la limite d'endurance

σ est le critère de fatigue

V est le volume à risque où $\sigma > \sigma_u$

La détermination des paramètres \bar{A} , h , n et e (décrivant le comportement du matériau) ainsi que de la limite d'endurance est délicate, car ils ne sont pas directement basés sur la description des mécanismes d'endommagement, et doivent donc être réactualisés pour chaque matériau ou pour un changement de qualité du matériau en pratiquant de nombreux essais de fatigue. De plus, afin de réduire le nombre d'essais nécessaires à la détermination de ces paramètres, des conditions d'essais très sévères ont souvent été utilisées, ce qui a pu conduire à l'activation de mécanismes d'endommagement différents de ceux rencontrés en service.

Les modèles physiques s'appuient sur l'identification du mécanisme d'endommagement et sont constitués de l'enchaînement de la modélisation de l'amorçage d'une fissure avec la modélisation de sa propagation. Ils s'appuient sur les concepts de la micro-mécanique et de la théorie des dislocations. Plusieurs modèles existent (Cheng et al [9]). Nous résumons ici les bases du modèle développé au Groupe d'Etude de Métallurgie Physique et de Physique des Matériaux (GEMPPM) [8, 39, 40, 42, 59]. Ce modèle permet d'expliquer la formation des écailles amorcées sur inclusion dans les aciers à roulement de type 100Cr6 et M50.

Le mécanisme mis en jeu est basé sur l'incompatibilité de déformation entre l'inclusion et la matrice. Ces incompatibilités sont accommodées par l'émission de dislocations qui créent les papillons de fatigue observés expérimentalement. Ces dislocations, en s'accumulant, conduisent à l'amorçage d'une fissure, qui va ensuite se propager. L'application de ce modèle aux différentes inclusions présentes dans la zone sollicitée par le contact permet de définir une durée de vie du contact. La répétition de ce processus à une famille de contacts permet d'obtenir la distribution des durées de vie qui résulte de la dispersion inclusionnaire liée au processus d'élaboration du matériau. Grâce à ce modèle, on peut déterminer la limite d'endurance $H1$. C'est la pression de Hertz que l'on peut appliquer sur le contact sans qu'il y ait émission de dislocations irréversibles autour des inclusions, c'est à dire sans que la micro-limite d'élasticité ne soit dépassée, en tenant compte des hétérogénéités microstructurales. La micro-limite d'élasticité est la limite d'élasticité pour une déformation d'épreuve de $20 \cdot 10^{-6}$ def et correspond aux premiers mouvements irréversibles des dislocations.

I.3.2 FATIGUE DE ROULEMENT INITIEE AU VOISINAGE DES RUGOSITES.

Lorsque les surfaces ne sont pas lisses, les surpressions générées au niveau du contact ainsi que l'augmentation du frottement se traduisent par des sollicitations élevées en surface ou à proximité de la surface de contact. La figure I.12 schématise l'allure du niveau de sollicitation sous la surface en fonction de la charge appliquée et de l'amplitude des rugosités. Lorsque les sollicitations dépassent la micro-limite d'élasticité (en tenant compte des hétérogénéités microstructurales), il peut y avoir initiation de micro-fissures dans ces zones (figure I.12).

Les micro-fissures amorcées peuvent se propager et donner lieu à du micro-écaillage ou à de l'écaillage. Pour qu'il y ait écaillage profond, il est nécessaire qu'un "pont" de contrainte relie la zone sollicitée en surface et la zone de Hertz [48]. Cette situation correspond à des surfaces très rugueuses et des pressions de Hertz élevées (figure I.12)

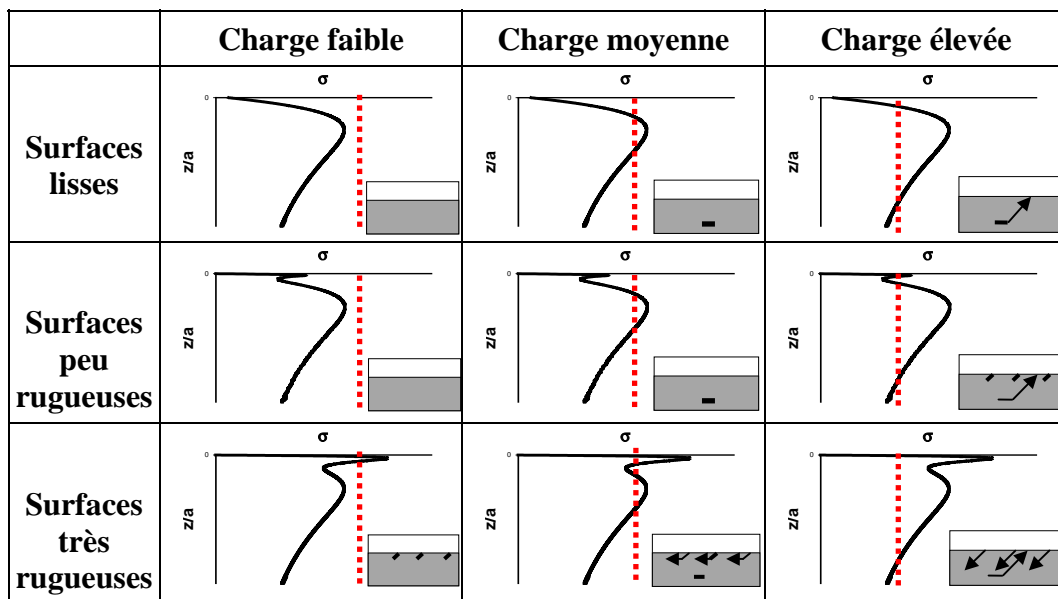


Figure I.12. Compétition entre la fatigue de roulement initiée en sous-couche et celle initiée en surface en fonction du niveau des contraintes de cisaillement selon la profondeur [47].
(Le trait pointillé correspond à une contrainte limite, fonction du matériau, en deçà de laquelle aucun endommagement n'apparaît)

L'endommagement initié en surface est susceptible de se produire dès que l'amplitude des rugosités est voisine de l'épaisseur du film d'huile séparant les surfaces en contact. Le paramètre Λ permet ainsi de quantifier la sévérité d'une application au regard de la fatigue de roulement initiée près des rugosités.

I.3.3 FATIGUE DE ROULEMENT INITIEE AU VOISINAGE DES INDENTS.

Les indents créent également des surpressions dans le contact, et donc des surcontraintes dans le massif. A ce titre, ils sont une source d'endommagement en fatigue de roulement.

La localisation des sites d'initiation dépend des conditions de fonctionnement (figure I.13). En roulement pur, il est fait état d'endommagements initiés en amont ou en aval de l'indent dans le sens du roulement, avec une proportion tout de même plus élevée pour l'initiation en aval. En présence de glissement, l'initiation se fait en aval dans le sens du frottement. L'étude du champ de pression EHD permet d'expliquer la localisation du site d'initiation par rapport au sens du frottement. En particulier, il a été montré par Dumont [18] qu'en présence de glissement le champ de pression est dissymétrique, et que le pic de pression le plus important est situé en aval de l'indent dans le sens du frottement.

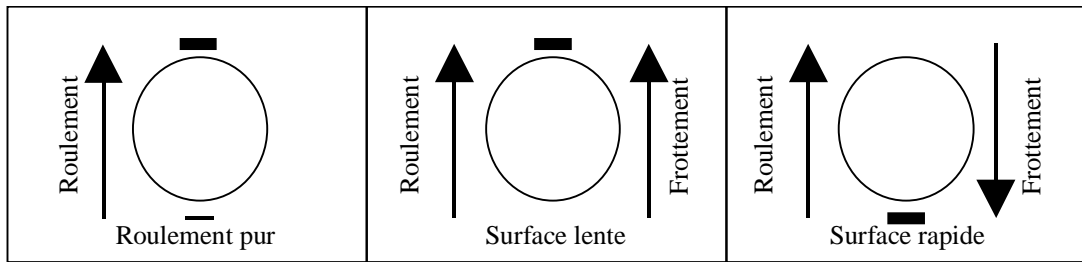


Figure I.13. Localisation des sites d'initiation autour d'un indent.

L'endommagement en fatigue de roulement au voisinage de l'indent se traduit par du micro-écaillage ou par un écaillage profond. Les écailles et les micro-écailles se propagent dans le sens du roulement (opposé au sens du passage de la charge).

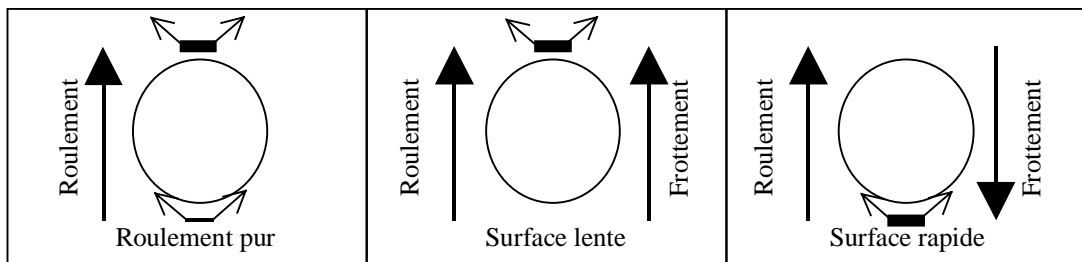


Figure I.14. Propagation des micro-fissures autour d'un indent.

Pour les surfaces rugueuses, la présence ou l'absence de surpressions permet de déterminer si la rugosité est dangereuse ou non au regard de la fatigue de roulement. Ce type d'analyse ne peut pas être appliqué directement au cas des indents. En effet, les surpressions créées par un indent peuvent être élevées et provoquer d'importants dépassements locaux de la micro-limite d'élasticité (caractérisés par l'évolution géométrique de l'indent et le matage du bord de l'indent) sans que celui-ci ne présente de signe d'endommagement. L'origine de l'endommagement initié au voisinage des indents n'est pas comprise. En conséquence, il n'existe pas de critère ou de modèle permettant, d'après les caractéristiques d'un indent, de déterminer une limite d'endurance ou une durée de vie.

La variation des surpressions et des surcontraintes en fonction des caractéristiques des indents a été étudiée par plusieurs auteurs. Dans la majorité des cas, seules les contraintes dues au champ de pression ont été prises en compte. Ces calculs ont été couplés avec des modèles de durée de vie phénoménologiques pour estimer la sévérité des indents. Ces études ne permettent pas d'estimer une limite d'endurance ou une durée de vie pour deux raisons :

- les sollicitations estimées ne tiennent pas compte de la présence des contraintes résiduelles générées pendant l'indentation et pendant les premiers passages de la charge.
- les propriétés mécaniques du matériau utilisées dans le modèle de durée de vie sont celles du matériau de base et ne prennent pas en compte l'évolution due à l'écrouissage pendant l'indentation et pendant les premiers passages de la charge.

I.3.4 BILAN.

Les mécanismes de l'écaillage amorcé sur inclusion sont bien connus. Afin de limiter ces écaillages, les aciers à roulement sont doublement refondus sous vide (VIM-VAR), pour diminuer le nombre et la taille des inclusions. De plus, la connaissance de la taille et de la nature des inclusions permet, grâce au modèle de durée de vie développé par le GEMPPM, de déterminer la charge maximale que peut supporter le contact sans risquer une avarie initiée sur une inclusion.

La fatigue de roulement initiée en surface par la rugosité des surfaces de contact est elle aussi maîtrisée. En effet, la super finition des surfaces de contact, couplée avec une épaisseur de film d'huile suffisante permet de limiter très fortement les surcontraintes en peau des massifs, et donc l'initiation de l'endommagement dans ces zones.

Le problème majeur est lié à l'endommagement initié au voisinage des indents. En effet, ces derniers apparaissent au cours du fonctionnement du mécanisme et, s'ils sont nocifs, peuvent provoquer une avarie rapide du mécanisme, que l'on ne sait pas encore maîtriser.

I.4 LE MATERIAU SOLLICITE, LE 32CrMoV13 NITRURE.

Les deux axes de lutte contre la fatigue de roulement sont d'une part la limitation des sollicitations dues au contact, et d'autre part l'augmentation des capacités du matériau.

Les facteurs permettant de limiter les sollicitations dues au contact sont la pression de Hertz et la micro-géométrie des surfaces. L'augmentation de la capacité du matériau passe elle par l'augmentation de la micro-limite d'élasticité, mais aussi par l'amélioration de la propreté inclusionnaire et par la réduction des sollicitations subies grâce à la présence de contraintes résiduelles de traitement thermique ou thermochimique. Le choix du matériau et de son élaboration sont donc des axes importants de la lutte contre la fatigue de roulement.

L'acier 32CrMoV13 nitruré présente une grande dureté en surface et des contraintes résiduelles de compression élevées. A ce titre, il est un bon candidat pour les applications où la tenue en fatigue de roulement est primordiale, car il permet à la fois d'obtenir une micro-limite d'élasticité élevée et de réduire les sollicitations subies.

Le matériau que nous allons étudier est le 32CrMoV13 nitruré. L'acier 32CrMoV13 a été doublement refondu sous vide (VIM VAR). Avant nitruration, il a été austénitisé, trempé à l'huile et revenu à 630°C pendant 3h. La composition chimique du 32CrMoV13 est donnée dans le tableau suivant en pourcentage massique.

| C | Si | Mn | S | P | Ni | Cr | Mo | V |
|-------|------|------|--------|-------|------|------|-----|------|
| 0,334 | 0,24 | 0,48 | <0,002 | 0,007 | 0,10 | 2,93 | 0,9 | 0,32 |

Tableau I.1. Composition chimique du 32CrMoV13.

I.4.1 LE TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION.

a) Principe.

Le traitement thermochimique de nitruration est un apport d'azote par diffusion à des températures comprises entre 350 et 590°C (inférieures au palier eutectoïde du diagramme FeN - figure I.16) réalisé en phase ferritique.

Le traitement de nitruration est généralement réalisé sur des aciers trempés puis revenus à une température supérieure à la température de nitruration, pour qu'il n'y ait pas d'évolution du métal de base autre que celle provoquée par la nitruration.

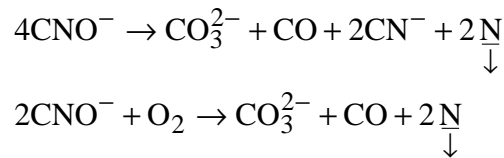
La nitruration provoque un durcissement par transformation in-situ et ne nécessite pas de traitement complémentaire pour obtenir les propriétés d'emploi.

b) Mise en œuvre.

Il existe plusieurs procédés pour effectuer le traitement thermochimique de nitruration. L'ensemble de ces procédés est basé sur un enrichissement superficiel de l'acier traité en produisant de l'azote atomique près de la surface.

Nitruration en bain de sel

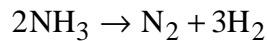
Le dispositif de traitement comporte un four à creuset métallique, dont le matériau est préconisé par le fournisseur du sel. Le maintien en température doit être garanti à 5°C près. L'élément nitrurant est le cyanate CNO⁻. Il se décompose suivant une réaction de dismutation et d'oxydation.



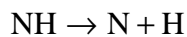
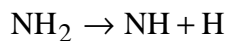
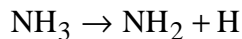
La nitruration en bains de sels conduit à des traitements très courts, avec présence systématique d'une couche de combinaison microporeuse composée principalement de nitrure ϵ (cf I.4.2). De plus, en raison des constituants chimiques des bains utilisés, cette méthode nécessite un lourd traitement des déchets, ce qui a tendance à limiter son utilisation industrielle.

Nitruration gazeuse à l'ammoniac.

La nitruration gazeuse à l'ammoniac consiste à injecter de l'ammoniac anhydre dans un four étanche avec un bon brassage de l'atmosphère et une précision en température élevée. Le débit de gaz fixe le taux de dissociation de l'ammoniac selon la réaction suivante :



La fraction de gaz non dissociée subit un craquelage catalytique au contact de l'acier



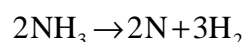
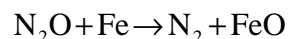
Une partie de l'azote naissant diffuse alors à partir de la surface de l'acier. La quantité d'azote qui diffuse dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique.

Nitruration ionique

La nitruration ionique permet de durcir la surface par décharge plasma sous courant continu. Après une montée en température sous vide de la charge de nitruration, un mélange d'azote et d'hydrogène est introduit dans le four. La charge est maintenue à une tension comprise entre -500 et -1000V . L'azote est alors dissocié ($\text{N}_2 + e^- \rightarrow 2\text{N} + e^-$), ionisé ($\text{N} + e^- \rightarrow \text{N}^+ + 2e^-$) et accéléré vers la charge. A proximité de la charge, les ions positifs fixent un électron ce qui provoque la décharge plasma. L'énergie cinétique libérée lors de l'impact des atomes avec la pièce contribue à la maintenir à la température désirée pour la nitruration.

Nitruration basse pression

Le principe de la nitruration basse pression est d'utiliser du protoxyde d'azote qui a un pouvoir catalytique sur le phénomène de nitruration. L'atmosphère initiale est composée d'ammoniac, de protoxyde d'azote et d'azote. Les réactions qui se produisent sont:



Le niveau de pression ainsi que le taux de renouvellement de l'atmosphère permettent la réalisation de traitements en semi vrac.

I.4.2 MICROSTRUCTURE RESULTANT DU TRAITEMENT DE NITRURATION.

a) Microstructure générale des aciers nitrurés.

La structure observée après nitruration se compose généralement de deux zones distinctes (figure I.15). A la surface, on observe une couche blanche s'étendant jusqu'à environ 30 μm de profondeur. Sous cette couche blanche, appelée aussi couche de combinaison, on trouve une couche de diffusion, dont l'épaisseur varie de quelques dixièmes de millimètre jusqu'à un millimètre.

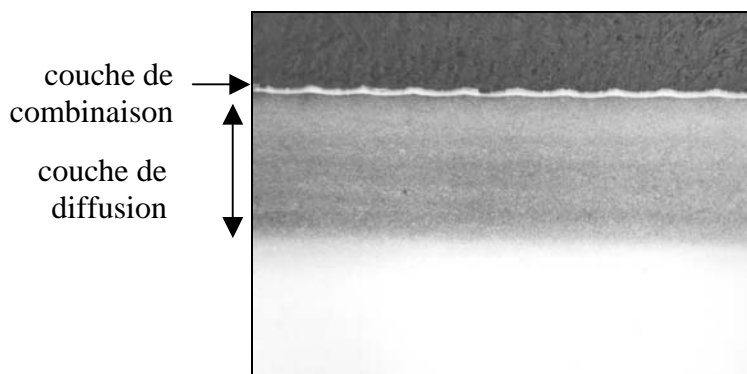


Figure I.15. Micrographie d'un acier nitruré[21].

Le diagramme fer-azote (figure I.16) permet de situer les principales phases en présence. On constate, aux températures utilisées, l'existence des phases suivantes :

solution solide α d'azote dans le fer

nitrures γ' de structure cubique à faces centrées Fe_4N

nitrures ϵ de structure hexagonale compacte de composition Fe_{2-3}N .

En considérant que le taux d'azote décroît quand on s'éloigne de la surface, on aura, en partant de la surface, la présence successive de

nitrures ϵ

mélange nitrures γ' nitrures ϵ

mélange solution solide α d'azote dans le fer nitrures γ'

solution solide α d'azote dans le fer nitrures γ'

Les trois premières phases forment la couche de combinaison, qui est composée essentiellement de nitrures, d'où sa couleur blanche après attaque au nital. La couche de diffusion, quant à elle, est composée, à la température de nitruration, de solution solide α qui, au refroidissement, va s'appauvrir en azote en précipitant des nitrures.

En raison des porosités constatées dans la couche de combinaison, cette dernière ne résiste pas à la fatigue de roulement. Aussi, dans nos applications, elle sera systématiquement abrasée. Dans la suite, nous allons nous intéresser uniquement à la couche de diffusion.

| Nitrures | Réseau de Bravais | Paramètre \AA | Affinité standard de formation (J/mole de N_2) |
|-----------------------|-------------------|------------------------|---|
| Mo_2N | CFC | $a = 4,169$ | -69,4 |
| CrN | CFC | $a = 4,149$ | -118 |
| VN | CFC | $a = 4,139$ | -251 |

Tableau I.2. Données cristallines et thermodynamiques de quelques nitrures [30].

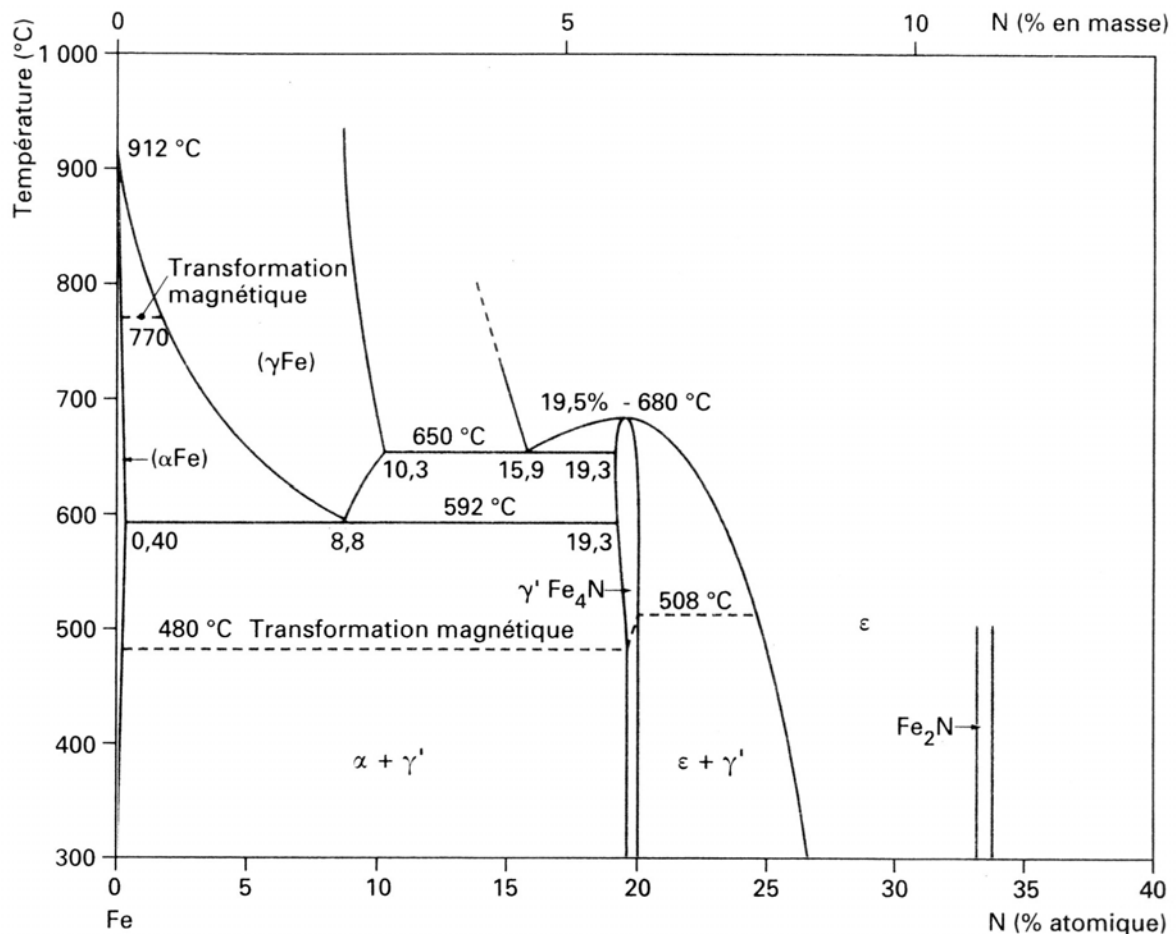


Figure I.16. Diagramme d'équilibre fer-azote[30].

Précipitation dans la couche de diffusion. Influence des éléments d'alliage.

Il est important de noter que si la couche de diffusion est uniquement composée de solution solide α , le durcissement obtenu est relativement faible. En revanche, la présence d'éléments d'alliage présentant une grande affinité avec l'azote favorise la formation de précipités semi-cohérents qui sont autant d'obstacles aux mouvements de dislocations, provoquant ainsi un durcissement important du matériau. De plus, ces précipités, en déformant la matrice de la ferrite (paramètres de maille différents), sont responsables de l'apparition de contraintes résiduelles. Enfin, en raison de la mobilité élevée de l'azote par rapport à celle des éléments d'alliage, cette précipitation sera finement répartie dans la couche de diffusion. Le durcissement provoqué par la nitruration d'un acier allié est un durcissement structural.

Les éléments ayant une grande affinité avec l'azote sont le chrome, le vanadium, le molybdène, l'aluminium et le manganèse (tableau I.2). Le durcissement obtenu par précipitation dépend de l'affinité avec l'azote de l'élément considéré, mais aussi des paramètres cristallins du nitrure formé. Les nitrures de structure cubique à faces centrées ayant un paramètre de maille proche de 4,04 Å (diagonale de la maille de la ferrite) produisent un durcissement important.

b) Microstructure du 32CrMoV13 nitruré.

Avant nitruration, le 32CrMoV13 a une structure ferritique non recristallisée. La morphologie en lattes de la structure martensitique a été conservée. L'épaisseur de ces anciennes lattes est de quelques dixièmes de micron. Il existe une précipitation inter et intragranulaire. Dans les grains, deux familles de précipités, orientées à 70° l'une de l'autre existent (figure I.17). Ces précipités, dont la longueur est de l'ordre de la centaine de nanomètres, ont été identifiés comme de la cémentite.

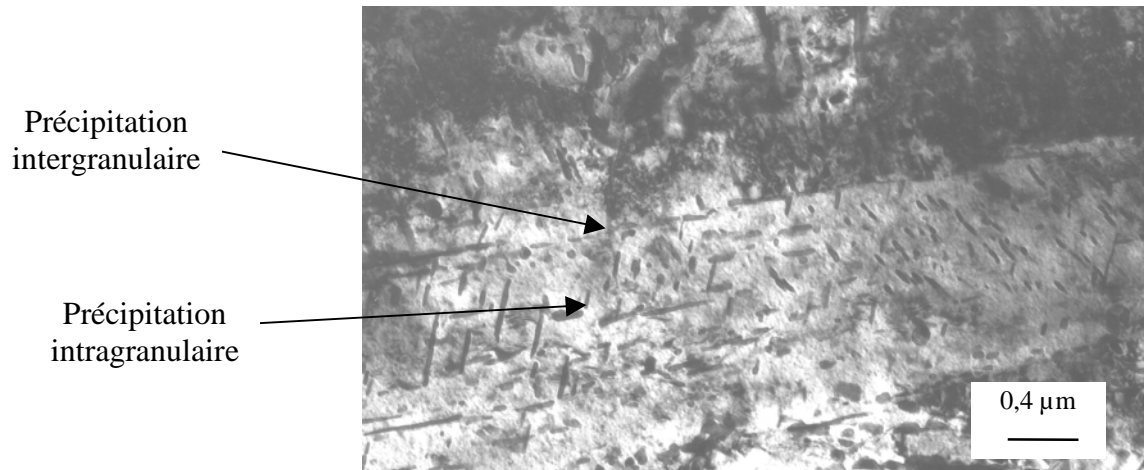


Figure I.17. Micrographie de l'état pré-traité avant nitruration [21].

Après nitruration, la zone sous la couche de diffusion, non concernée par l'apport d'azote n'a pas évolué. Dans la couche de diffusion, trois échelles de précipitation sont observées. Tout d'abord, des liserés de cémentite, dits cheveux d'ange, se sont développés parallèlement à la surface (figure I.18). La taille caractéristique de ces précipités est de quelques microns de long (maximum 10 µm) pour une largeur de l'ordre du micron. Ensuite, la seconde échelle de précipités correspond à la cémentite déjà présente avant la nitruration (figure I.19). Enfin, les observations effectuées au MET montrent l'existence d'une précipitation très fine (figure I.20), à l'origine du durcissement provoqué par le traitement de nitruration. Ces précipités semi-cohérents sont répartis selon trois plans orthogonaux, correspondant aux plans {100} de la ferrite. Ce sont des nitrures, principalement du nitrure de chrome (CrN), mais on trouve aussi du nitrure de vanadium (VN) et du nitrure de molybdène (Mo₂N).

El Ghazal a observé que la fine précipitation de nitrures évolue en fatigue. Les nitrures les plus fins semblent avoir été dissous au profit des nitrures subsistants dont l'épaisseur augmente.

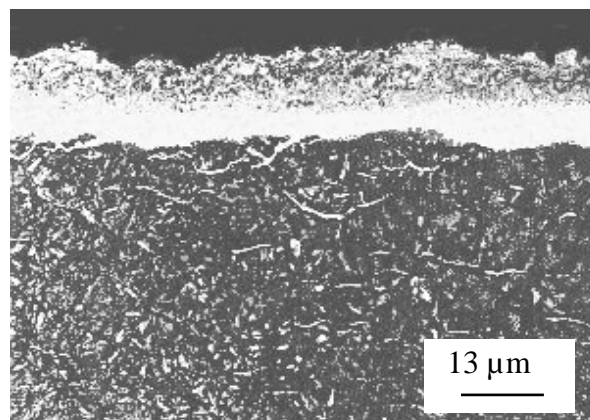


Figure I.18. Cheveux d'anges dans le 32CrMoV13 nitruré[21].

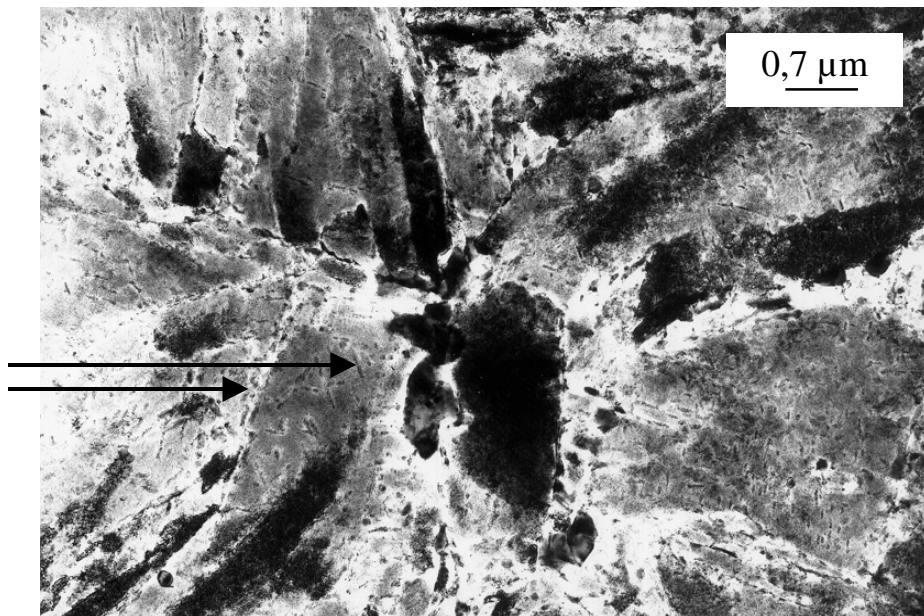


Figure I.19. Précipitation inter et intra granulaire après nitruration [21].

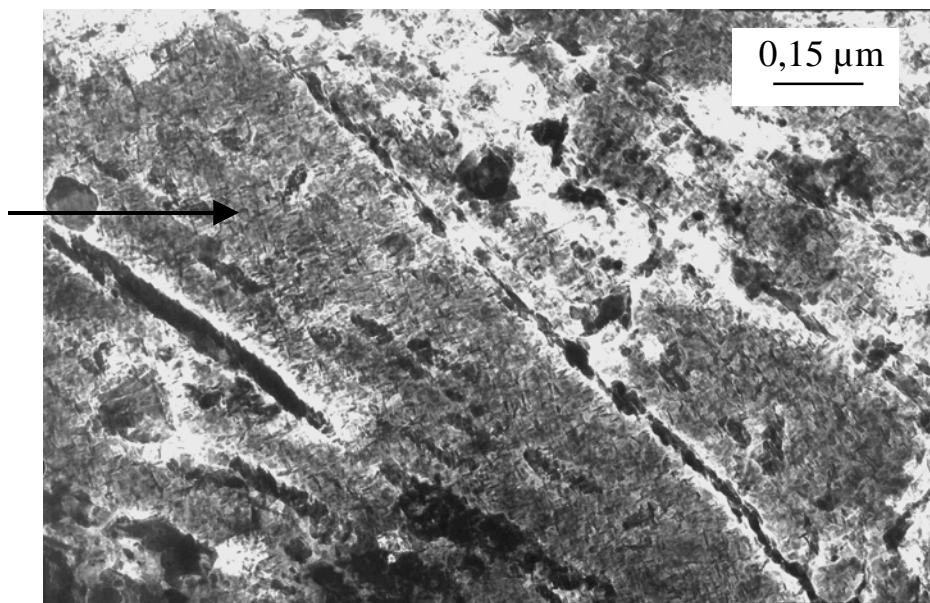


Figure I.20. Précipitation fine après nitruration [21].

I.4.3 PROPRIETES MECANIQUES DU 32CrMoV13 NITRURE.

La présence d'éléments d'alliage favorise le durcissement structural du matériau par précipitation de l'azote pour former des nitrures. La concentration en nitrure variant avec la distance à la surface nitrurée, le traitement thermochimique de nitruration crée un profil de propriétés mécaniques. La dureté et la limite d'élasticité varient avec la profondeur. De plus, la distorsion du réseau cristallin par l'insertion d'azote et la précipitation de nitrures génère un profil de contraintes résiduelles.

La dureté permet de définir la profondeur de nitruration, distance entre la surface et la zone à cœur où la dureté est égale à la dureté à cœur augmentée de 100 MPa (norme NF A 04204).

Selon l'enrichissement en azote et la nature des précipités formés, la dureté en surface peut monter jusqu'à 1300 Hv.

a) Contraintes résiduelles.

Dans la couche de diffusion, les contraintes résiduelles sont des contraintes de compression qui peuvent atteindre des niveaux élevés, jusqu'à -800 MPa [2]. De plus, il a été constaté que ces contraintes sont stables jusqu'à 400°C en raison de la stabilité thermique des précipités formés pendant le traitement de nitruration, entre 500 et 600°C .

El Ghazal a déterminé le profil de contrainte résiduelle du 32CrMoV13 nitruré par la méthode d'enlèvement de couche. Sur un plateau nitruré (figure I.21) de 13 mm d'épaisseur et de 40 mm de côté, on enlève successivement des couches de matière. Après chaque enlèvement de couche on mesure la déformation de l'éprouvette à l'aide de jauges de contrainte situées sur la face opposée et on en déduit la valeur moyenne de la contrainte dans la couche.

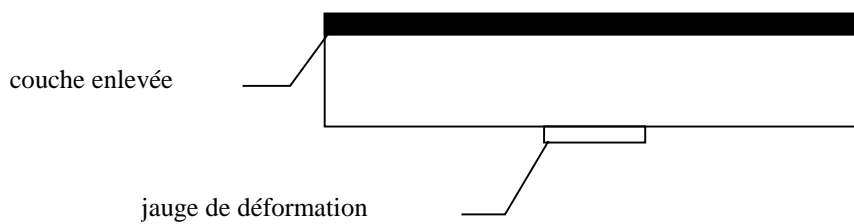


Figure I.21. Mesure des contraintes résiduelles par enlèvement de couche.

Nous pouvons observer sur la figure I.22 le profil de contrainte résiduelle ainsi déterminé par El Ghazal.

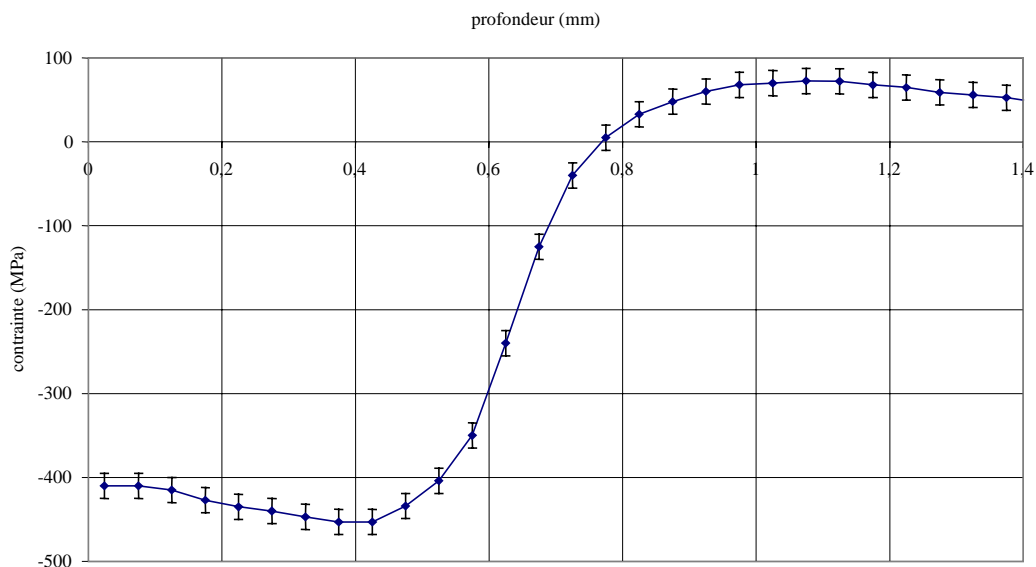


Figure I.22. Profil de contrainte résiduelle sur le 32CrMoV13 nitruré [21].

b) Micro-limite d'élasticité.

La seconde propriété mécanique qu'il est important de connaître en vue d'étudier le comportement en fatigue de roulement d'un acier est la micro-limite d'élasticité. Cette grandeur n'est pas à confondre avec la limite d'élasticité conventionnelle. Alors que cette dernière est déterminée pour une déformation d'épreuve de 0,2 %, la microlimite d'élasticité, définie par Lamagnère [40] correspond à la contrainte provoquant une déformation plastique de 0,002 % (20 μ def). La microlimite d'élasticité est donc une mesure beaucoup plus fine. Sa détermination est très délicate dans un matériau traité en surface, puisqu'il est nécessaire d'effectuer une mesure locale. Une technique basée sur l'essai de nano-indentation a été mise au point par El Ghazal. Sa présentation détaillée et son développement font l'objet du chapitre III.

I.5 BILAN.

La fatigue de roulement initiée au voisinage des indents est un phénomène encore mal connu. En particulier le niveau des sollicitations subies par le matériau et ses propriétés mécaniques en fonctionnement, c'est à dire après la formation de l'indent et après le rodage qui s'effectue durant les premiers passages de la charge sur l'indent nouvellement créé, restent à préciser.

La démarche que nous nous proposons de mettre en place pour étudier la fatigue de roulement initiée sur indentation vise tout d'abord à améliorer la connaissance des propriétés du matériau et des sollicitations subies en service, puis, sur cette base, à étudier l'initiation de l'endommagement (figure I.23).

Les caractéristiques mécaniques initiales du matériau sont modifiées lors de l'indentation. Il ne s'agit pas ici de modéliser le piégeage d'une particule dans le contact, mais de s'intéresser à une indentation dite artificielle, réalisée par un pénétrateur sphérique en diamant. La modélisation du processus d'indentation permet de déterminer l'évolution des caractéristiques du matériau ainsi que les contraintes résiduelles d'indentation.

Le passage de la charge sur l'indent doit ensuite être considéré. Au cours des premiers cycles, le rodage de l'indent se traduit par une évolution supplémentaire des caractéristiques du matériau, par l'ajout de contraintes résiduelles de rodage et par l'évolution de la géométrie de l'indent. Au terme de cette démarche, nous disposons alors des contraintes subies et des propriétés du matériau en service. Nous pouvons alors utiliser cette connaissance pour comprendre les mécanismes à l'origine de l'initiation de l'endommagement au voisinage de l'indent.

Pour suivre ce chemin, il faut disposer d'un outil permettant de simuler le processus d'indentation. Les caractéristiques de ce problème (grandes déformations et axisymétrie de l'indenteur) nous incitent à le résoudre par éléments finis. L'étude du rodage nécessite la résolution du contact indenté élastoplastique, en prenant en compte le trajet de l'indent dans le contact. Nous avons vu précédemment que la résolution par éléments finis n'est pas adaptée à ce problème. Nous avons donc mis au point un code de calcul permettant de résoudre ce problème. Son développement fait l'objet du second chapitre de ce document.

Pour connaître les caractéristiques finales du matériau, après indentation et rodage, il est nécessaire de déterminer finement ses caractéristiques initiales. Le 32CrMoV13 nitruré étant un acier à gradient de propriétés, la détermination des caractéristiques mécaniques est délicate, puisqu'elle nécessite une mesure locale. Le troisième chapitre est consacré au développement d'une méthode de mesure locale de micro-limite d'élasticité adaptée au 32CrMoV13 nitruré et à l'étude des contraintes résiduelles de nitruration. Nous avons alors pu déterminer les données d'entrée de notre problème, à savoir les propriétés mécaniques initiales du 32CrMoV13 nitruré.

Après avoir développé le code de contact élastoplastique et caractérisé les propriétés initiales du matériau, nous avons étudié expérimentalement l'initiation de l'endommagement. Cette étude, qui fait l'objet du chapitre IV, nous a permis de mettre en évidence l'influence des conditions d'indentation et de passage de la charge sur l'initiation de l'endommagement. Enfin, une étude des sollicitations subies et de l'évolution des propriétés mécaniques du 32CrMoV13, présentée au chapitre V, a permis de mieux comprendre les phénomènes à l'origine de l'initiation de l'endommagement par fatigue de roulement au voisinage des indents.

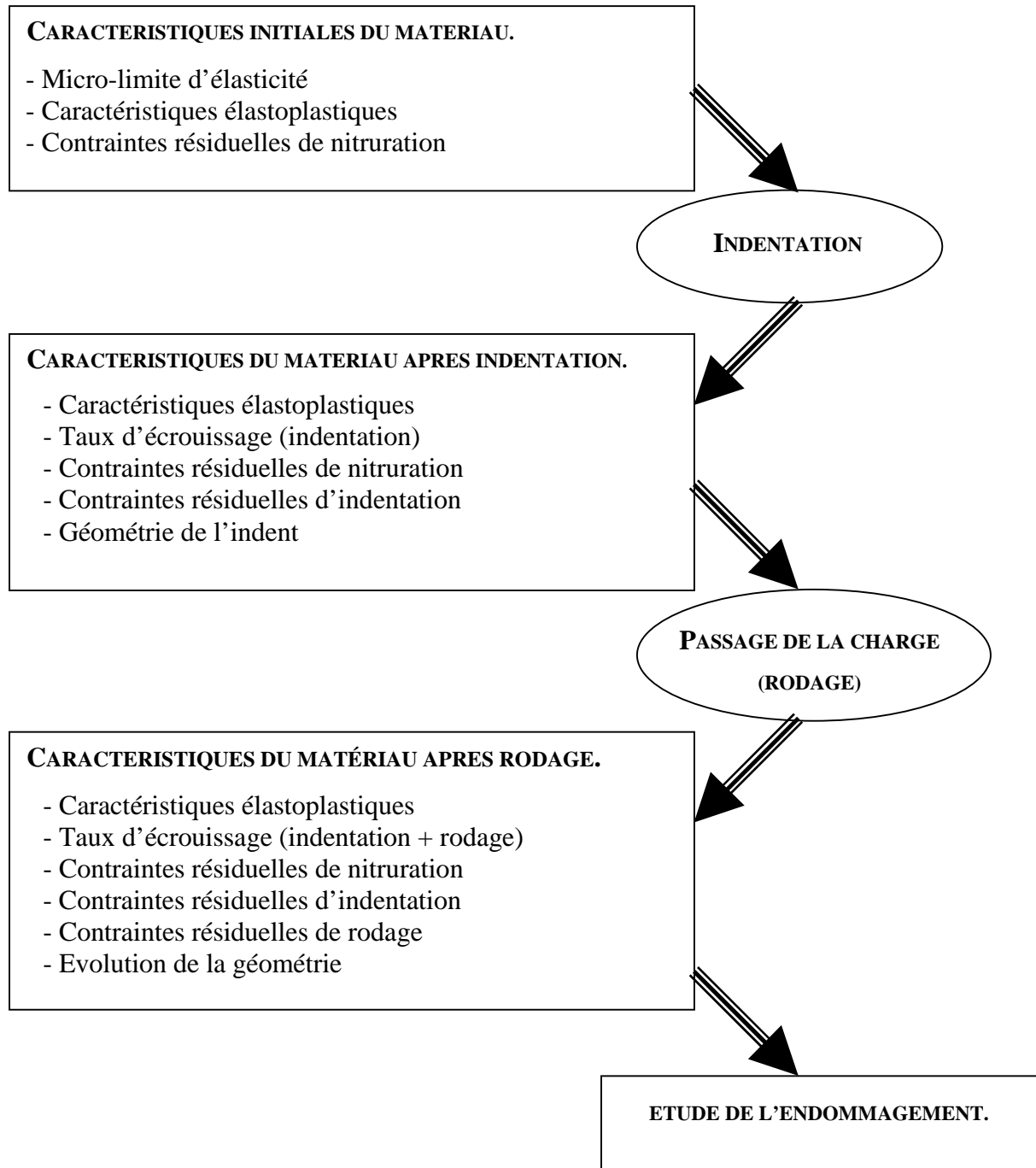


Figure I.23. Evolution des caractéristiques initiales du matériau au cours des événements.

