

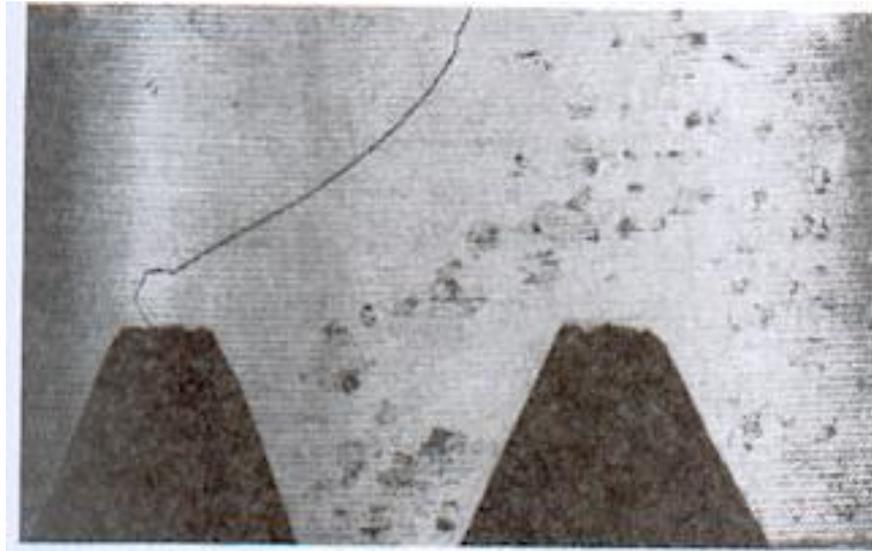


**Figure IV-09 : Micro écaillage [87]**

#### **IV.3.1.6 Fissuration**

Ce défaut apparaît dans les dentures en aciers fins durcis par traitement thermique et qui sont sensibles aux concentrations de contraintes.

L'apparition des fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau et généralement elle se trouve du côté de la dent sollicitée à l'extension (figure IV.10). Elle progresse à chaque mise en charge de la dent [87].



**Figure IV-10 : Fissuration au pied de la dent [87]**

Les fissurations sont de diverses sortes, généralement liées à des défauts de fabrication ; elles peuvent altérer l'état des surfaces, comme par exemple des fissures dues aux forgeages, des tapures de trempe, des criques de rectification, des criques d'origine thermique, des fissures de fatigue,...

### IV.3.2 Détérioration par rupture

Les causes de détériorations des dents sont multiples. La rupture est une avarie brutale et souvent inattendue. Elle est parmi les plus dangereuses, car elles entraînent l'arrêt de l'installation, et parfois la destruction généralisée par suite de l'entraînement de partie de dents dans l'engrènement. On distingue généralement [87]:

- Ruptures par surcharge.
- Ruptures de fatigue.
- Ruptures par concentration de contraintes.
- Ruptures provenant de défauts de traitement thermique.
- Ruptures provenant de défauts de rectification.

#### IV.3.2.1 Ruptures par surcharge

Ces ruptures surviennent le plus souvent d'un seul coup, c'est-à-dire en une seule mise en charge de la dent.

La surface de rupture peut indiquer (figure IV-11) :

- Des zones granuleuses et brillantes, appelés "zones de rupture fragile" ou le métal s'est rompu parce qu'il n'a pu supporter les contraintes de traction atteintes.
- Des zones avec arrachements ou même bourrelets lisses, appelés "zones de rupture ductile" ou le métal a perdu sa cohésion par suite des contraintes de cisaillement atteintes.

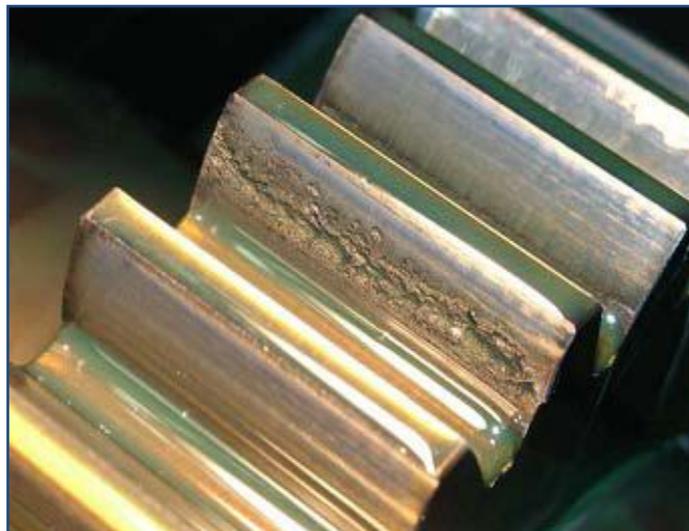


Figure IV-11 : Rupture par surcharge [87]

### IV.3.2.2 Ruptures de fatigue

Comme tous les phénomènes de fatigue, c'est une dégradation progressive. Contrairement aux autres formes d'usure, celle-ci concerne les engrenages bien lubrifiés.

Les endommagements peuvent rester longtemps cachés avant de se manifester brutalement, ou bien se révéler de façon spectaculaire et précoce. L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

D'une manière générale, cette fatigue se produit sous l'effet des contraintes tangentielles alternées. Si le frottement est très faible ces contraintes sont maximales en profondeur, ce qui peut être le cas avec les dentures très bien lubrifiées. Par contre, si les forces de frottement ne sont plus négligeables, le cisaillement est maximal en surface [88]. Selon les circonstances, l'amorçage des fissures de fatigue se fera en sous-couche ou bien de façon apparent sur la peau de la pièce. Il ya donc diverses formes possibles, que nous allons passer en revue et on distingue :

- La fatigue superficielle par écrouissage qui est due aux contraintes maximales de traction ou de compression, le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat lustré du métal et la disparition des marques d'usinage. L'incubation est assez courte, survenant même dans des contacts peu chargés, puis de petites piqûres se forment, alignées le long des aspérités initiales [89].
- La fatigue profonde après un long temps de vieillissement se produit une émission brutale de particule dans la surface atteint quelques mm<sup>2</sup>, la profondeur quelques dixième de mm, et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées, découvrant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli. Les détériorations par écaillage concernent au premier chef les roulements et les engrenages. Elles dépendent de nombreux paramètres : vitesse de glissement, rugosités, nature et microstructure des matériaux, duretés, contrainte d'hertz, inclusions, lubrifiant et additifs. Parfois, les contraintes dues à la flexion ou à la torsion peuvent accélérer le processus [87]. La rupture des dents est due essentiellement à la fatigue car chaque amorçage de l'engrènement produit à la racine de la dent des contraintes de flexion alternatives à allure périodique (figure IV-12).



**Figure IV-12 : Rupture par fatigue** [87]

A certains nombres de cycles nous aurons la formation d'une crique à la surface de raccordement dans la zone de concentration des contraintes maximales. La crique se forme dans la zone d'extension. La rupture met en général un certain temps pour être effective. Elle commence souvent par une petite crique qui se remplit d'huile et s'agrandit, et où le léger glissement qui se produit occasionne une sorte de « fretting » [88].

La résistance de la dent à la rupture peut être accrue en augmentant la résistance de la racine et en diminuant la concentration de contraintes dans cette zone. Pour cela, il faut augmenter le rayon de congé de raccordement, soigner la surface des entre dents, augmenter la rigidité de l'engrenage, améliorer la qualité de fabrication et les propriétés des matériaux.

### **IV.3.2.3 Ruptures par concentration de contrainte**

Cette avarie (figure IV-13) se manifeste suite à des défauts de positionnement des dentures les unes par rapport aux autres, dus par exemple à :

- Une erreur relative de distorsion des dentures conjuguées.
- Un mauvais alignement des axes (fabrication, déformation).

Ce mode de rupture est souvent accompagné de traces de piqûres et d'écaillage dans les zones de portage.

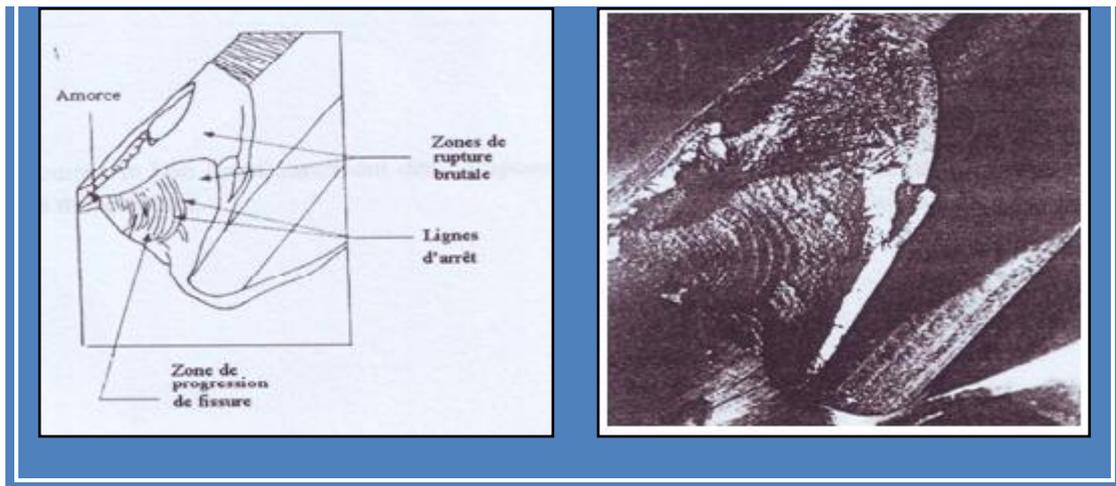


Figure IV-13: Rupture par concentration des contraintes [87]

#### IV.3.2.4 Rupture provenant de défauts de traitement thermique

Le traitement thermique a une importance toute spéciale. En effet, dans un engrenage, on peut distinguer les qualités géométriques et les qualités mécaniques. Les premières, grâce aux procédés modernes de taillage et de finition des dentures, peuvent atteindre un très haut degré de perfection. Les secondes sont fonction des caractéristiques physiques du métal constituant l'engrenage. Ces caractéristiques, dont les principales sont : la limite élastique, la résilience et la résistance à l'usure, dépendent du traitement thermique ; si l'on considère que ce traitement influe également sur les qualités géométriques par les déformations plus ou moins grandes qu'il peut entraîner, on aperçoit toute l'importance qu'il convient de lui attribuer dans la fabrication des engrenages [87].

#### IV.3.2.5 Ruptures provenant de défauts de rectification

Des criques peuvent apparaître par suite d'un échauffement superficiel important, et sont des amorces de rupture (figure IV-14). Un contrôle par ressuage ou magna flux est plus que nécessaire. Il vaudrait mieux éviter de rectifier les fonds des dents [89].

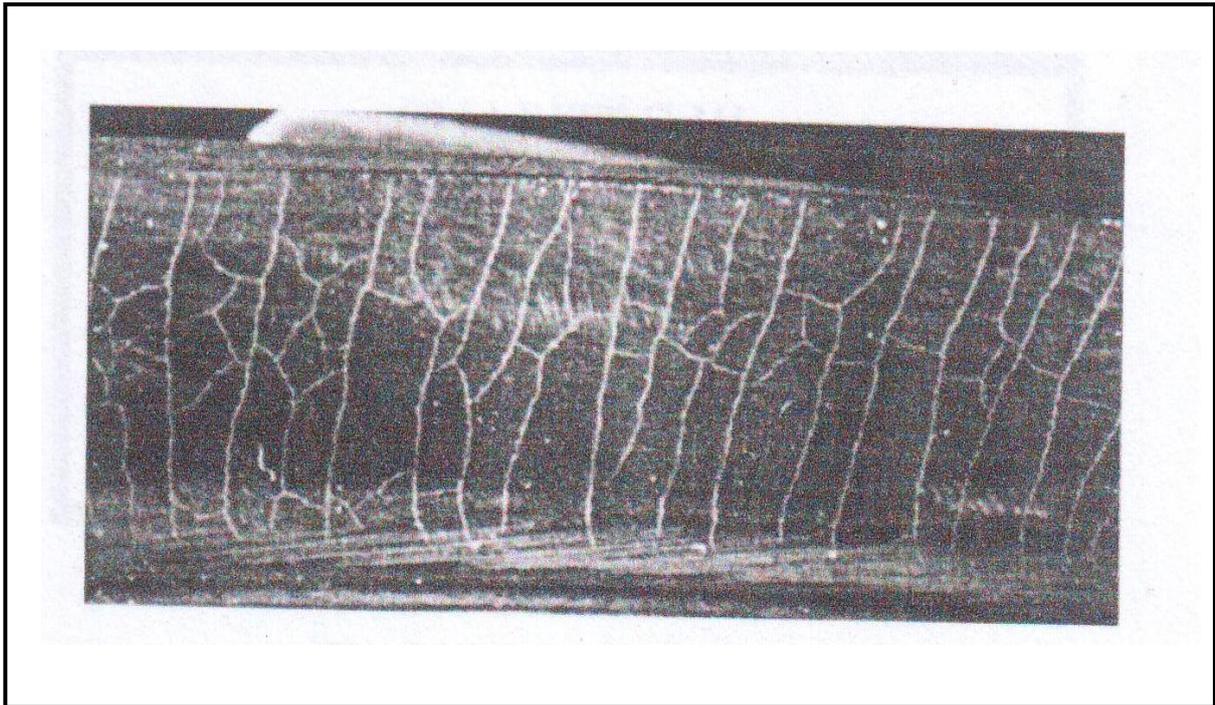


Figure IV-14 : Criques de rectification [87]

### IV.3.3 Autres défaillances observés sur les dentures

#### IV.3.3.1 Défaut de lubrification

La lubrification est l'un des problèmes le plus important et le plus délicats qui puissent se poser pour le bon fonctionnement des engrenages.

La lubrification à un triple but :

- Eviter le contact métal sur métal qui pourrait provoquer, au bout d'un temps très court, une sorte de soudage des dentures conjuguées. Nous savons en effet que les conditions de glissement et de pression superficielle sont souvent très sévères dans les engrenages. Il est donc nécessaire d'interposer un film d'huile résistant entre les dentures conjuguées. Il ne faut pas perdre de vue que le soudage peut se produire à des températures bien au dessous du point de fusion du métal si la pression de contact est élevée.
- La lubrification s'impose également pour la question du rendement de l'engrenage. Un frottement métal sur métal entraînerait un coefficient de frottement beaucoup plus élevé.

- Une autre fonction importante du lubrifiant consiste à absorber la chaleur dégagée durant l'engrènement (la perte de rendement est en effet matérialisée par un dégagement de chaleur).

Un volume d'huile souvent important est nécessaire pour éviter un échauffement anormal de l'engrenage [89].

### **IV.3.3.2 Corrosion**

#### **IV.3.3.2.1 Corrosion chimique**

Elles provoquent des taches de couleur brune rouge, des irrégularités de surface, des piqûres souvent foisonnantes, plus ou moins bien réparties sur tout ou partie des zones exposées. Il s'agit évidemment d'attaques chimiques ou électrochimiques.

Souvent, cette attaque résulte de produits contaminants introduits dans le carter, mais très fréquemment elle est due à la présence d'eau amenée par des fuites ou par la condensation. Le lubrifiant peut lui aussi être incriminé, pour diverses raisons :

- Acidification due au vieillissement,
- Présence d'additifs extrêmes pressions trop agressives,
- Activation de ces additifs par la présence d'eau ou par une température excessive.

Parfois les engrenages sont corrodés avant même leur introduction dans le carter, à cause d'un nettoyage avec des substances agressives, d'un mauvais stockage ou encore du simple contact avec des mains en sueur ...

Les dentures corrodées ont un aspect peu engageant mais leur fonctionnement n'est que rarement altéré. Toutefois il faut se méfier des résidus d'oxydation qui peuvent être très durs et engendrer une usure abrasive [90].

#### **IV.3.3.2.2 Corrosion de contact**

Elle concerne :

- D'une part les dentures ordinaires soumises, pendant le transport ou l'arrêt, à des vibrations d'origine extérieure,
- D'autre part les accouplements à denture soumis, avec une protection insuffisante, à des vibrations de torsion ou à de petits mouvements dus au désalignement.

La corrosion de contact produit des quantités importantes d'oxydes abrasifs qui vont polluer les lubrifiants et provoquer, dans les cas graves, une usure destructrice [91].

### IV.3.3.3 Surchauffe :

Elles résultent d'un échauffement anormal consécutif à une surcharge, une survitesse, un défaut de lubrification. Les plages colorées que l'on constate ne doivent pas être confondues avec le résultat d'une oxydation ou d'une corrosion. La chute des caractéristiques mécaniques favorise l'apparition du grippage et dans les cas les plus graves, elle peut conduire à un écrasement de la denture par fluage à chaud [91].

## IV.4 Simulation numérique

### IV.4.1 Présentation du matériau

Le matériau utilisé dans cette campagne de simulation est un acier de nuance 30NCD16 dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques sont rappelées dans les tableaux 1 et 2 respectivement [92].

C	S <sub>i</sub>	M <sub>n</sub>	C <sub>r</sub>	M <sub>o</sub>	N <sub>i</sub>	S	P
0.31	0.25	0.49	1.39	0.5	4.08	0.004	0.008

**Tab. IV-1 Composition chimique de l'acier 30NCD16 (en pourcentage massique) [92].**

Module d'Young, E (MPa)	213000
Coefficient de Poisson, $\nu$	0.29
Limite d'élasticité à 0.02% R <sub>p0.02</sub> (MPa)	785
Limite d'élasticité à 0.2% R <sub>p0.2</sub> (MPa)	950
Résistance maximale en traction, R <sub>m</sub> (MPa)	1110
Résistance ultime en traction, R <sub>u</sub> (MPa)	1860
Allongement total à rupture, A (%)	11
Module d'érouissage monotone, K (MPa)	1440
Exposant d'érouissage monotone, n	0.07
Limite d'endurance en flexion alternée, $\sigma_D$ (MPa)	680
Limite d'endurance en torsion alternée $\tau_D$ (MPa)	426

**Tab IV-2 Caractéristiques mécaniques de l'acier 30NCD1 [92].**

#### IV.4.2 Protocole de simulation

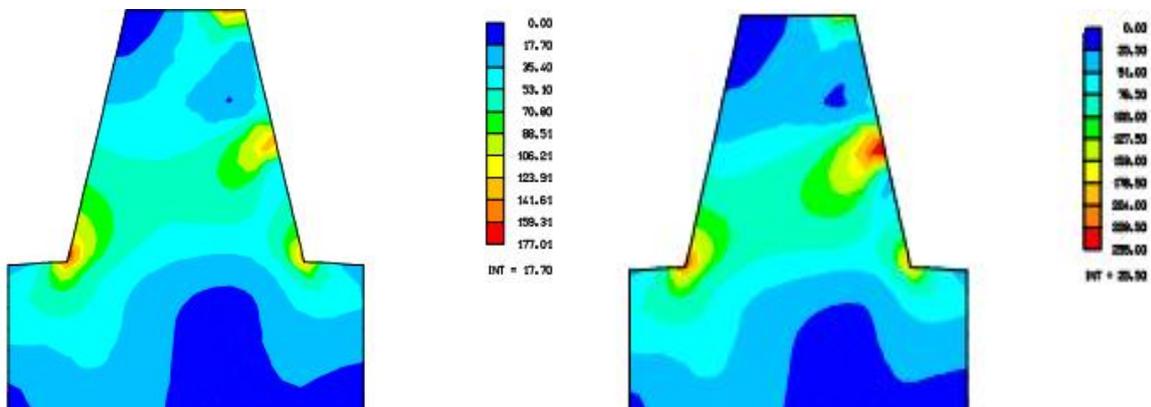
Afin de visualiser d'une part la variation de la fissure en fonction du nombre de cycles, et d'autre part l'effet des paramètres géométriques de l'engrenage à savoir (le nombre de dent, le module, la largeur de la dent et l'angle de pression, la puissance) des exemples ont été pris en considération. Il s'agit tout d'abord de déterminer la géométrie de la dent d'engrenage étudié, de modéliser la dent en question comme une poutre encastree et déterminer par la méthode des éléments finis la contrainte maximale. Le calcul des contraintes a été réalisé à l'aide du logiciel RDM 6.

#### IV.4.3 Exemple de simulation

La simulation est faite sur un système d'engrenages composé de deux roues dentées comportant respectivement 73 et 146 dents avec un module  $m=3$ ,  $\alpha=20^\circ$ , la largeur  $b=25\text{mm}$  et une puissance d'entrée de 2kw.

#### IV.4.4 Résultats numériques des contraintes en pied de dents

Dans cette partie, et à travers les sept images de la figure IV-15 et le tableau 03, nous avons varié la charge pour obtenir la contrainte maximale qui peut engendrer la fissure de la dent, les contraintes de VON MISES au niveau de la dent en fonction de la charge actionnée graduellement jusqu'à la charge maximale de 1000N.



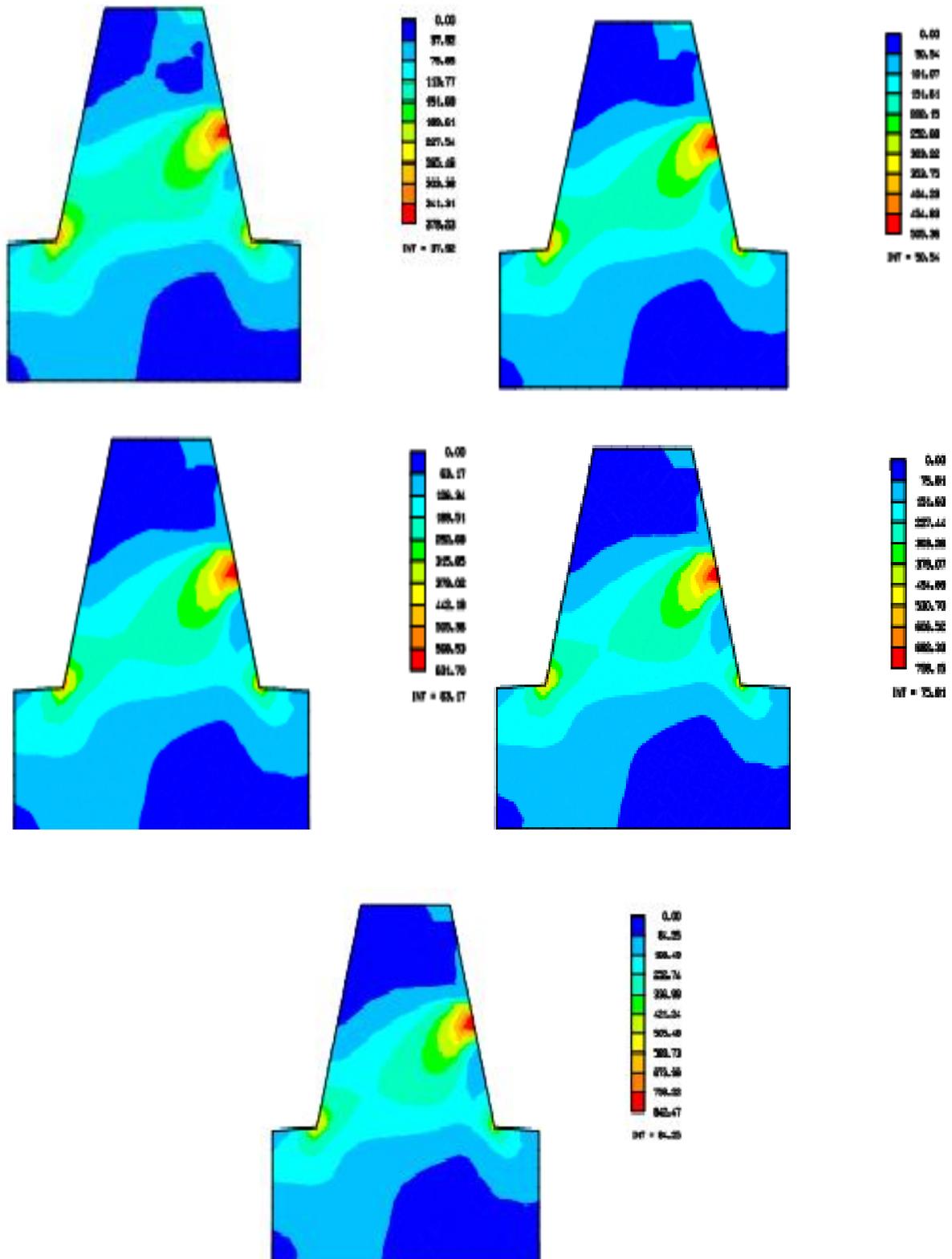


Figure. IV-15 Contraintes de VON MISES au niveau de la dent chargée