

Chapitre 4 : Différents types de fatigue

4.1 Géométrie et fatigue

Les matériaux présentant une sensibilité élevée aux entailles ont une limite de fatigue plus basse. Une entaille nette, une fissure ou un défaut dans la géométrie du matériau peut réduire de manière significative sa résistance à la fatigue en concentrant les contraintes et en favorisant l'apparition de fissures.

Les expériences ont montré que l'effet des petites entailles est inférieur à celui estimé à partir du facteur de concentration de contrainte traditionnel K_t . **Le facteur d'entaille en fatigue K_f** peut être considéré comme la concentration de contrainte effective en fatigue. Il dépend de la taille de la concentration de contrainte et du matériau. Les petites concentrations de contrainte sont plus efficaces dans les matériaux à haute résistance. Cet effet est traité à l'aide d'un facteur de sensibilité à l'entaille q :

$$K_f = 1 + (K_t - 1) \cdot q$$

Le facteur de sensibilité à l'entaille q est une constante déterminée empiriquement qui dépend du rayon de l'entaille et de la résistance du matériau.

Expérimentalement, les pièces plus grandes ont des limites de fatigue inférieures à celles des pièces plus petites (Facteur de taille). Étant donné que les données des matériaux sont obtenues à partir de petits échantillons, un facteur de correction, appelé facteur de taille, est utilisé pour les diamètres plus grands. Pour les sections non circulaires, un diamètre effectif est calculé. Le diamètre effectif est obtenu en équivalant le volume de matériau soumis à 95% de la contrainte maximale à une barre ronde en flexion avec le même volume fortement sollicité.

4.2 Facteur de sécurité

Le facteur de sécurité est la marge de réduction appliquée à la résistance maximale des matériaux afin d'assurer une conception sûre. Un seul facteur de sécurité est appliqué à la fois à l'amplitude de contrainte et à la contrainte moyenne. Cela peut être représenté graphiquement dans le diagramme de Goodman.

4.3 Fatigue des matériaux composites

Un matériau composite est défini comme un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, de natures différentes, qui donnent au nouveau matériau de meilleures propriétés physiques que celles de chaque composant pris séparément (Berthelot, 2010; Gornet, 2008). Les matériaux composites sont constitués d'un

renfort noyé dans une matrice. Le renfort peut être composé de fibres, ou de particules, et supporte l'essentiel des efforts appliqués à l'ensemble. La matrice, quant à elle, assure le lien entre les fibres et, transmet les efforts au renfort. Elle peut également servir à protéger le renfort contre des agressions extérieures, comme des attaques chimiques. Le matériau composite ainsi constitué combine les propriétés mécaniques du renfort à la légèreté de la matrice, ce qui lui confère un rapport résistance/poids bien meilleur que celui d'un matériau métallique. Les matériaux composites peuvent être classés en fonction des propriétés et de la nature de leurs fibres, ou de leur matrice.

Les renforts utilisés dans l'industrie sont majoritairement en verre, en carbone Il existe également des renforts en bore (très chers), ou naturels, tels que le lin. Les fibres de verre présentent le meilleur rapport résistance/coût, ce qui en fait les fibres les plus utilisées dans l'industrie. On les retrouve notamment dans le bâtiment ou le nautisme. Les fibres de carbone, quant à elles, présentent une meilleure rigidité que les fibres de verre, mais également un coût de production plus élevé : qualifiées de matériau à hautes performances, ces fibres sont utilisées en sport, dans l'aéronautique et le spatial. Enfin, les fibres d'aramide sont plus connues sous le nom de leur utilisation commerciale : le Kevlar. Ces fibres offrent une excellente absorption des vibrations, d'où leur utilisation principale en tant que pare-balles. Les matrices, quant à elles, sont classées en différentes familles, selon leur composition : sont ainsi distingués les Composites à Matrice Céramique (CMC), à Matrice Métallique (CMM) ou à Matrice Organique (CMO). Le choix de la matrice dépend de l'environnement dans lequel va être utilisé le composite, ainsi que de son application structurelle. Ainsi, les composites à matrice organique sont utilisés principalement pour des pièces soumises à des températures inférieures à 300°C, tandis que les composites à matrice céramique ou métallique sont préférés pour des pièces devant résister à des hautes températures (environnement moteur). Dans le cas des CMO, la matrice, généralement une résine, peut être encore classée en deux sous-catégories selon ses propriétés thermiques : les matrices thermodurcissables et les matrices thermoplastiques. Les matrices thermodurcissables sont obtenues à partir de polymères amorphes, mis en forme sous l'effet de la chaleur. Leurs propriétés thermomécaniques sont élevées, et présentent un vieillissement lent ; cependant, toute mise en forme est définitive, ce qui empêche leur recyclage. A l'inverse, les matrices thermoplastiques, composées de polymères semi-cristallins, se figent à faible température et refondent à haute température, une fois la température de fusion de la résine atteinte, ce qui en permet un éventuel remodelage. Il est ainsi plus facile de stocker ces matériaux (sous forme semi-finie), de les réparer et de les recycler. Cependant, leur procédé de fabrication est plus complexe, et leur résistance au vieillissement est moins connue que celle des thermodurcissables, ce qui explique que ces matrices sont moins répandues, et leurs propriétés moins étudiées que celles des thermodurcissables.

Architecture d'un matériau composite

Du fait de sa structure anisotrope, un matériau composite est défini par la nature de ses constituants, ainsi que par la taille, l'orientation et l'architecture du renfort. Le choix de ces paramètres se fait en fonction des sollicitations mécaniques qui sont appliquées sur le matériau pendant sa durée de vie (Neveu et al., 2019). En premier lieu, la sélection des fibres et de la matrice dépend du domaine d'application : milieu en haute température, milieu corrosif, nécessité d'avoir une rigidité dans une direction privilégiée, etc. Quant aux spécifications liées aux renforts, l'orientation et l'architecture des fibres dépendent de leur taille : en effet, les fibres peuvent être longues (longueur supérieure au centimètre), courtes (longueur allant du millimètre au centimètre), ou réduites à l'état de particules ou de charges (Figure).

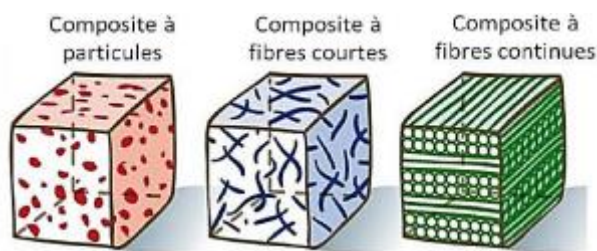


Figure I-1 : Schématisation d'un matériau composite avec des fibres particules, des fibres courtes et des fibres longues (Boufaïda, 2015)

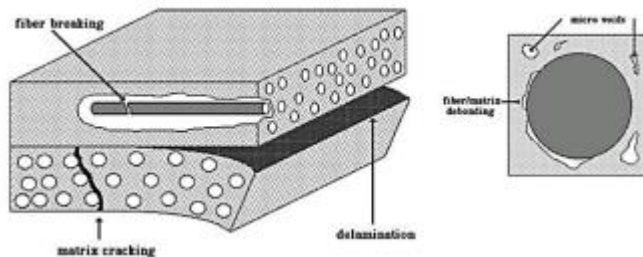
Dans le cas des particules ou des fibres courtes, le renfort peut être disposé aléatoirement ou être semi orienté dans le matériau composite. Ce dernier présente alors des propriétés mécaniques quasi-isotropes, puisque les fibres n'ont pas de directions privilégiées. La fibre longue, quant à elle, peut se présenter sous différentes formes : unidirectionnelle, tissu bidimensionnel ou tridimensionnel. Les fibres unidirectionnelles présentent une grande résistance dans le sens des fibres, qui sera l'axe privilégié des sollicitations mécaniques. A l'inverse, le tissage des fibres dans les trois directions permet une meilleure homogénéisation des propriétés et une meilleure performance résiduelle après impact, mais présente une moins bonne rigidité que le matériau composite stratifié, en raison de l'ondulation des fibres tissées. Pour faciliter la mise en œuvre du composite, les fibres sont assemblées pour former des torons. L'alignement de torons unidirectionnels (UD) dans un même plan forme un pli, chaque pli pouvant avoir son orientation propre. L'empilement de plusieurs plis forme un matériau composite dit stratifié. A l'inverse, lorsque les torons sont entrelacés, le matériau est dit tissé.

Endommagement des matériaux composites

Les matériaux composites, comme les matériaux métalliques, peuvent s'endommager au cours de leur durée de vie. Cependant, les mécanismes en jeu sont totalement différents : dans le cas des matériaux métalliques, l'étude de

l'endommagement est axée sur l'amorçage de la fissure qui va par la suite se propager rapidement jusqu'à provoquer la ruine du matériau. A l'inverse, du fait de leur hétérogénéité, les matériaux composites peuvent présenter plusieurs types d'endommagements, avec des scénarios de propagation très différents selon la structure du composite. Ainsi, l'amorçage de l'endommagement peut arriver en début d'essai, puis la propagation être lente (Esmaeillou, 2011; Muñoz Cuartas, 2015; Rakotoarisoa, 2013).

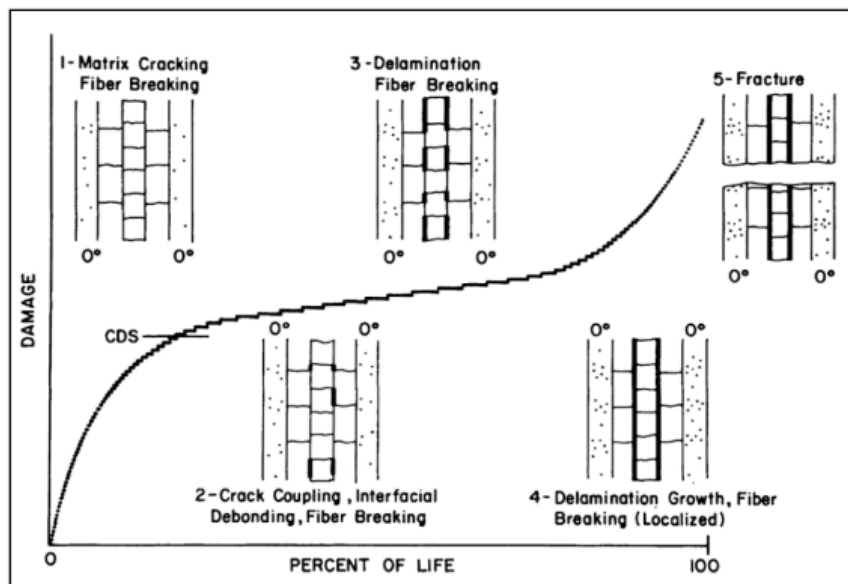
La Figure ci-dessous illustre les différents endommagements possible dans le cas d'un composite stratifié de plis UD : - **Fissuration matricielle** : apparition de microfissures, dues à une concentration de contraintes provoquée par une hétérogénéité importante ou par des inclusions. - **Décohésion fibre-matrice** : décollement au niveau de l'interface matrice/fibre, qui se défait. Il y a alors perte du transfert de charge entre la matrice et la fibre. - **Rupture de fibre** : correspond à un stade avancé de l'endommagement. L'accumulation de plusieurs ruptures de fibre va alors entraîner la ruine de la structure. - **Délamination** : Séparation de deux couches ou plis du composite. En termes d'échelle, cet endommagement correspond à un défaut « macroscopique », visible à l'œil nu, principalement rencontré dans les stratifiés, entre deux plis d'orientation différente présentant des modules très différents.



Mécanismes d'endommagement dans un stratifié UD (Revest, 2011)

Le scénario d'endommagement sous chargement monotone ou cyclique L'historique d'apparition de ces endommagements dans un matériau composite dépend de la structure et des constituants de ce dernier. Dans le cas de matériaux composites constitués de plis UD, les fibres sont orientées dans la même direction pour chaque pli. Cette structure en UD est majoritairement utilisée dans l'industrie aéronautique car elle propose une forte résistance de la structure dans le sens fibres. De nombreuses études portent donc sur ce type de matériau et les mécanismes d'endommagement sont bien maîtrisés (Berthelot, 2003; Gamstedt and Talreja, 1999; Huchette, 2006; Reifsnider and Talug, 1980; Talreja, 2014; Tang et al., 2004).

L'inconvénient majeur des composites UD réside dans leur faible résistance dans le cas de sollicitations hors plan : dans ce cas en effet, seule la matrice est soumise à l'effort, ce qui diminue grandement la résistance du matériau. Et en cas d'impact, les fissures provoquées par le choc peuvent se propager dans la matrice le long des fibres sans aucun obstacle, provoquant un délaminage important. Les composites tissés 3D, ou interlock, offrent quant à eux la possibilité de mieux résister aux chocs et aux sollicitations hors plan, en concédant une résistance moindre dans le sens des fibres. L'endommagement est alors plus complexe à suivre et à analyser, puisque les fissures provoquées à cœur du matériau ne vont pas systématiquement se propager jusqu'au chant de l'éprouvette, permettant leur observation.



Progression d'endommagement des composites stratifiés UD en fonction de la durée de vie Tirée de K.L. Reifsnider (1990, p.29)

En conclusion, la fissuration matricielle est le mécanisme d'endommagement dominant au début de la durée de vie en fatigue des composites stratifiés UD, suivi par la délamination pendant la phase intermédiaire et l'accumulation de différents modes d'endommagement durant la phase finale de la durée de vie en fatigue.

Les tests montrent comment les fibres et la matrice interagissent. Les fibres confèrent la résistance du matériau, tandis que la matrice répartit la charge uniformément. Ce travail d'équipe confère aux composites des propriétés exceptionnelles, qui en font des éléments clés de l'ingénierie actuelle. Les mécanismes de défaillance par fatigue sont : Rupture des fibres (les fibres individuelles peuvent se rompre sous l'effet du stress), fissuration matricielle, (de minuscules fissures se forment dans le matériau environnant), Délaminage (les couches du composite commencent à se séparer).

La fatigue des matériaux composites dépend de plusieurs facteurs :

1. Orientation des fibres
2. Propriétés des matériaux matriciels
3. Conditions de chargement
4. Expositions environnementales

4.4 La fatigue par corrosion

Le phénomène de fatigue peut être aggravé par la corrosion : un matériau résistant très bien à la fatigue et très bien à la corrosion dans un milieu donné, peut se rompre de manière catastrophique sous l'effet combiné de la fatigue et de la corrosion.

Définition : – Fatigue-corrosion –

C'est un Type de défaillance résultant de l'action simultanée d'une contrainte cyclique et d'une attaque chimique (William D. Callister, Glossaire, 2007)

La fatigue-corrosion peut être définie comme l'action combinée d'un environnement agressif et d'une contrainte cyclique conduisant à une rupture prématurée du métal par fissuration.

La corrosion peut intervenir de plusieurs manières sur la tenue en service des pièces ou ensembles mécaniques :

- en l'absence de sollicitation dynamique, la corrosion peut entraîner la fissuration progressive de pièces chargées statiquement dans un milieu agressif ; **c'est la corrosion sous contrainte** ;
- les efforts dynamiques interviennent sur la pièce, alors que celle-ci a subi une corrosion préalable ; il s'agit alors ici d'une **rupture par fatigue seule**, amorcée sur une piqûre de corrosion qui joue alors le même rôle qu'une entaille ;
- la fatigue et la corrosion agissent simultanément ; c'est bien sûr ce dernier cas qui conduit à la plus forte diminution de la résistance à la fatigue du matériau métallique. En général, en **fatigue-corrosion**, la courbe de Wöhler ne présente plus d'asymptote et il n'est donc plus possible de déterminer une limite de fatigue, comme c'était le cas dans la fatigue à l'air, mais seulement une limite d'endurance pour un nombre de cycles donné.

Compte tenu des différents paramètres entrant dans le phénomène de fatigue-corrosion, il est totalement illusoire de présenter des chiffres quelconques. Il faut seulement se rappeler qu'un acier à hautes caractéristiques sera plus affecté qu'un acier à faibles caractéristiques et qu'il peut être constaté des chutes spectaculaires de tenue dynamique (rapport de 4 à 5 entre la limite d'endurance à l'air et la limite

d'endurance en corrosion d'eau douce pour un acier traité pour une résistance à la traction de l'ordre de $1\,000\text{ N/mm}^2$). De plus, en fatigue-corrosion, la fréquence joue un rôle très important. En particulier, les basses fréquences augmentent généralement l'effet néfaste du phénomène de corrosion car il peut intervenir pendant un temps plus long, augmentant ainsi le dommage créé par cycle.

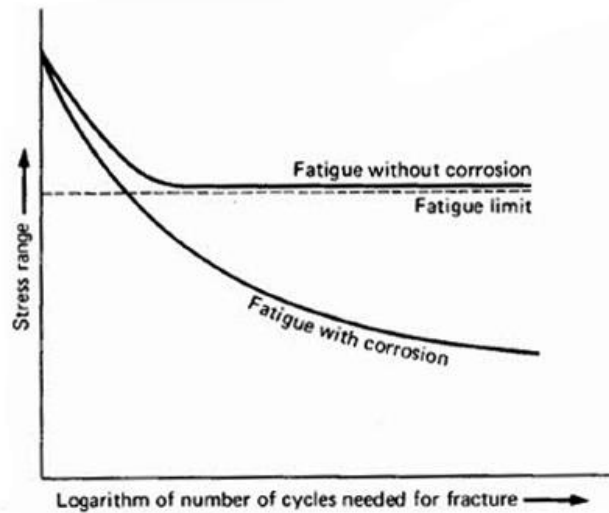
La fatigue-corrosion résulte de cycles de charge cumulés, entraînant une déformation plastique cyclique irréversible et localisée, due à des réactions chimiques ou électrochimiques.

La fatigue est déjà souvent décrite comme la cause la plus fréquente de défaillance en ingénierie et, en présence d'un environnement corrosif, il n'existe aucune garantie quant à la plage de contraintes admissible.

La fatigue-corrosion (FC) se définit comme l'ensemble des étapes successives d'endommagement du métal qui se développent sous l'effet de cycles de charge cumulés, dans un environnement agressif par rapport à un milieu inerte ou non agressif, et qui résultent de l'interaction entre une déformation plastique cyclique irréversible et des réactions chimiques ou électrochimiques localisées. On utilise traditionnellement le terme « fatigue-corrosion » pour désigner les environnements électrochimiques. Les expériences et analyses de fatigue mécanique, décrites en détail dans des ouvrages de référence récents, constituent le fondement de la compréhension de la FC.

La fatigue est souvent décrite comme la principale cause de défaillance des métaux utilisés en ingénierie. Lorsqu'un environnement corrosif est combiné à des contraintes de fatigue, la durée de vie en fatigue du métal diminue considérablement.

La première tendance observée dans le comportement en fatigue-corrosion est que la limite de fatigue de l'acier soumis à la fatigue à l'air est nettement inférieure, voire nulle, en milieu corrosif. La figure ci-dessous illustre cette tendance générale. Comme le montre cette figure, la résistance à la fatigue du métal en milieu corrosif diminue continuellement avec l'augmentation du nombre de cycles avant rupture. Il a été constaté que, pour la plupart des aciers faiblement alliés soumis à la fatigue au contact de solutions salines, il n'existe pas de « plage de contraintes admissible » au-delà de laquelle le métal aurait une durée de vie infinie.



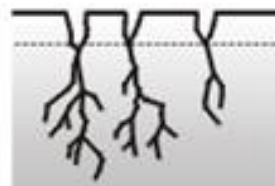
La corrosion-fatigue et son effet général sur le comportement de l'acier

Les fissures de fatigue-corrosion sont généralement non ramifiées, tandis que les fissures de corrosion sous contrainte sont généralement très ramifiées, comme l'illustre clairement les figures ci-dessous.

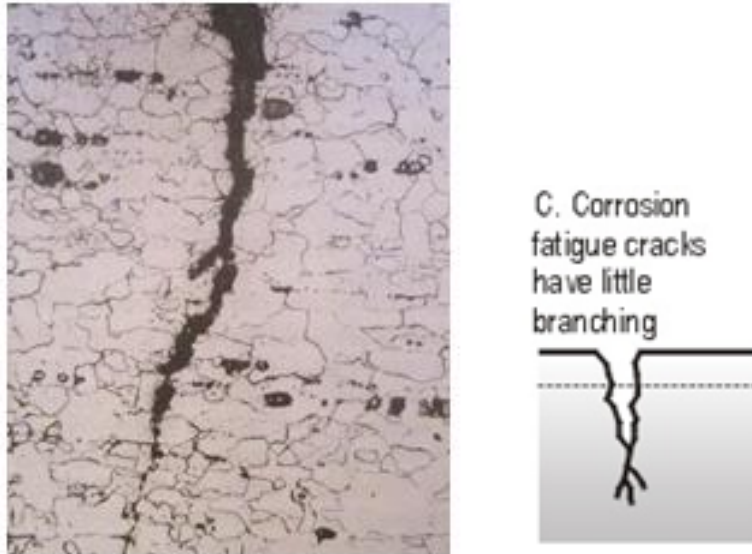
A. SCC or Fatigue Cracks nucleate at pits



B. SCC Cracks are highly branched



Stress-Corrosion cracking (SCC)



Fissure de fatigue-corrosion à travers une tôle d'acier doux, résultant de la présence de la tôle dans le condensat des gaz de combustion (Grossissement x250) (Uhlig, 2008)

4.5 Endommagement (D)

Un matériau est considéré sain s'il est dépourvu de fissures à l'échelle microscopique, ou, de manière plus réaliste si son comportement est celui d'un matériau élaboré dans les meilleures conditions possibles. L'étude de l'endommagement s'intéresse à l'évolution du matériau depuis le stade initial, où le matériau est qualifié de sain, jusqu'au stade où le matériau est considéré complètement endommagé, stade caractérisé par la présence de fissures de la taille de l'élément de volume représentatif du matériau. Cet élément de volume est suffisamment grand par rapport aux hétérogénéités du matériau pour être considéré homogène : cube de 0,1 à 1 mm de côté pour les métaux et les polymères, de 1 à 10 mm pour les composites et le bois, de 100 mm pour les bétons. Le but est donc de connaître à chaque instant l'état du matériau, son taux d'endommagement et de prévoir l'instant final défini précédemment.

Au delà de cette phase d'endommagement se produit la propagation de fissuration selon différents mécanismes en fonction du matériau et du mode de sollicitation. - La propagation de la fissure peut être spontanée dans le cas de la rupture fragile si la longueur critique de fissure au sens de la mécanique de la rupture a été atteinte. On est en présence d'un phénomène catastrophique d'instabilité.

La croissance de la fissure, stable dans le cas de la rupture ductile, dépend de la vitesse de chargement de la structure. Dans le bilan énergétique on prend en considération l'énergie dissipée par déformation plastique à la pointe de la fissure.

Lors du fluage des métaux à température élevée, la fissure croît sous sollicitation constante. La vitesse de propagation dépend de la contrainte appliquée.

Dans le cas de sollicitations répétées périodiques ou non la fissuration de fatigue croît de manière discontinue. La propagation de la fissuration progresse lors des cycles de contrainte et cesse à l'arrêt des sollicitations. Cette discontinuité crée l'aspect strié du faciès de rupture.

Quel que soit le mécanisme, le stade ultime est la rupture de la structure. La modélisation de la détérioration progressive de la matière qui précède la rupture macroscopique a été proposée par Kachanov en 1958 dans le cas du fluage des métaux et étendue à la rupture ductile et à la rupture de fatigue à partir de 1970, par J. Lemaitre et J. L. Chaboche.

D'autres endommagements existent, conséquences de mécanismes physicochimiques : effets de la corrosion ou des radiations par exemples. Les phénomènes peuvent interagir et se cumuler avec les endommagements d'ordre mécanique.

La quantification de l'endommagement proposée par Rabotnov et Kachanov, résumée ci après, s'effectue par l'intermédiaire de la mesure de l'évolution de caractéristiques mécaniques globales (caractéristiques d'élasticité, de plasticité ou de viscoplasticité).

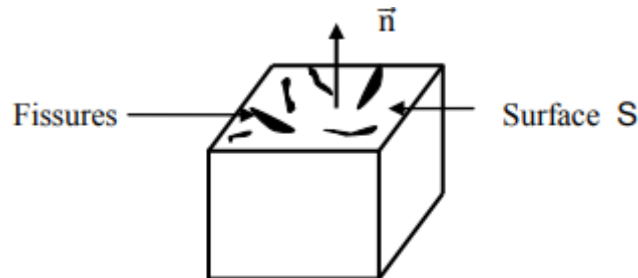


Figure 1.1 : élément de solide endommagé.

- S est l'aire de la section de l'élément de volume,
- S_D est l'aire totale de l'ensemble des fissures et des défauts, aire corrigée par les facteurs de concentration de contraintes.

Une concentration de contraintes est causée par toute discontinuité présente dans une pièce, fissures en particulier. La contrainte nominale doit être corrigée par un coefficient multiplicateur, facteur de concentration de contrainte K_t , fonction de la géométrie de la fissure, d'autant plus élevé que la fissure est aigüe et présente un faible rayon de courbure à son extrémité. Il est donc nécessaire de corriger l'aire S_D des défauts par les valeurs des coefficients K_t . En ce qui concerne l'accroissement local de contrainte dans la section S , une fissure de section S_D , quasi circulaire

présentant un K_t voisin de 2 est tout aussi pénalisante qu'une fissure de section elliptique très aplatie, pointue et de section 10 fois plus petite.

S est l'aire résistante effective tenant compte des fissures, des défauts et des concentrations de contraintes.

$$S = S - S_D$$

Par définition la mesure de la variable mécanique d'endommagement dans la

direction \vec{n} est :
$$D_n = \frac{S_D}{S}$$

D'un point de vue physique, D_n est l'aire relative des défauts (aire corrigée par les concentrations de contraintes). Mathématiquement, D_n est tel que $0 < D_n$

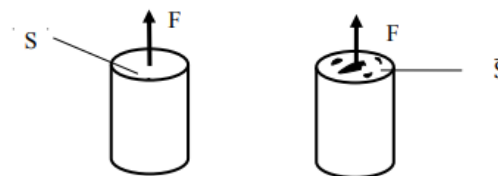
$D_n = 0$ quand le matériau est vierge, non endommagé,

$D_n = 1$ quand le matériau est rompu.

Si l'endommagement est isotrope, $D_n = D$: l'endommagement est identique dans toutes les directions.

2.2. Contrainte effective, équivalence en déformation

La contrainte effective est la force rapportée à la section S qui résiste effectivement aux efforts dans le matériau endommagé (figure).



Matériau saint et matériau endommagé

4.6 Fatigue thermomécanique (TMF)

La fatigue thermomécanique (TMF, thermo-mechanical fatigue) est la simulation de ce chargement mécanique conditionnée par la dilatation thermique du matériau. Pour la conception et construction de composants simultanément soumis à des contraintes thermiques et mécaniques cycliques, par exemple de turbines à gaz ou de moteurs à combustion, des valeurs caractéristiques fiables sont requises pour prédire la durée de vie à la fatigue et le comportement à la déformation cyclique dans les conditions de fonctionnement définies. Lors de la détermination de la **fatigue thermomécanique (TMF, thermo mechanical fatigue)**, les grandeurs

caractéristiques nécessaires au matériau sont déterminées par la combinaison en phase ou en déphasage de charges thermiques et mécaniques cycliques.

Outre une grande fiabilité de fonctionnement à long terme, les turbines de centrales électriques et d'avions doivent présenter une résistance suffisante aux variations de charge à court terme et aux opérations de démarrage et d'arrêt. La **fatigue thermomécanique (TMF, thermo-mechanical fatigue)** est la simulation de ce chargement mécanique conditionnée par la dilatation thermique du matériau. Au démarrage, tous les composants sont chauffés de la température ambiante vers leur température de fonctionnement ce qui s'accompagne d'une expansion du matériau. Cette expansion crée une contrainte dans le matériau, qui devra être précisément connue pour éviter d'endommager les composants. Dans le cas de pièces composites telles que les aubes de turbine avec couches d'isolation thermique en céramique, le désajustement thermique entre les composants métalliques et céramiques constitue une autre composante de la charge qui devra être prise en compte lors de la conception. De plus, les couches d'oxyde qui se forment pendant le fonctionnement ont une influence sur la durée de vie en fatigue.

Trois types de chargements en FTM

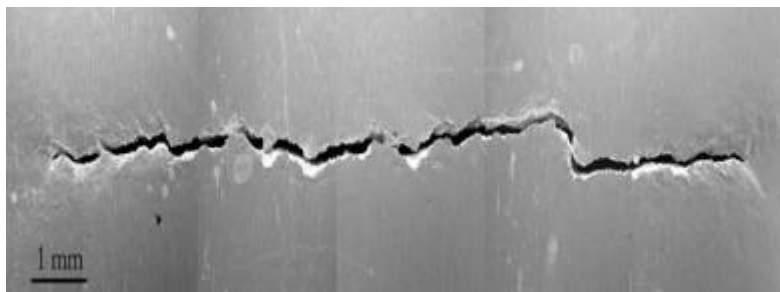
On distingue généralement :

TMF in-phase (IP) (en-phase) : La contrainte maximale se produit quand la température est maximale. Très sévère, car matériau affaibli à chaud.

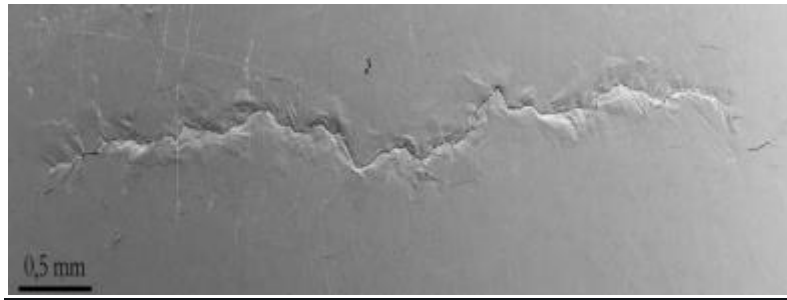
TMF out-of-phase (OP) (hors-phase): La contrainte maximale correspond à la température minimale. Différent mécanisme, souvent moins critique.

Matériaux courants étudiés en TMF :

Alliages de nickel (Inconel, superalliages), aciers inoxydables, alliages de titane, alliages d'aluminium, céramiques, composites à matrice métallique (MMC). Chaque famille réagit différemment suivant l'évolution des propriétés avec la température.



Fissure de fatigue thermomécanique en-phase (acier 314L)



Fissure fatigue thermomécanique hors-phase (acier 314L)

Fatigue-fluage

À haute température, le phénomène de fluage entraîne la déformation de la structure même si le chargement est constant. Sa combinaison avec la fatigue peut amplifier l'endommagement pour les éprouvettes lisses. En revanche, elle peut réduire l'endommagement de fatigue du fait de la relaxation de contrainte moyenne par le fluage dans le cas de structures.

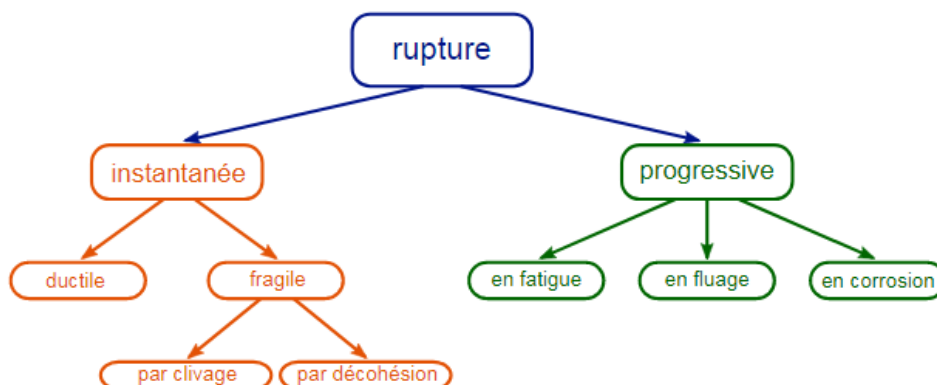
4.7 Analyse expérimentale de la fatigue

Les faciès de rupture d'éprouvettes peuvent être classés selon deux critères distincts liés d'une part à leur cinétique, d'autre part à leur observation (voir Fig. ci-après). Lors de sollicitations statiques ou quasi-statiques, les ruptures sont instantanées et traduisent le caractère ductile ou fragile du matériau. Elles sont :

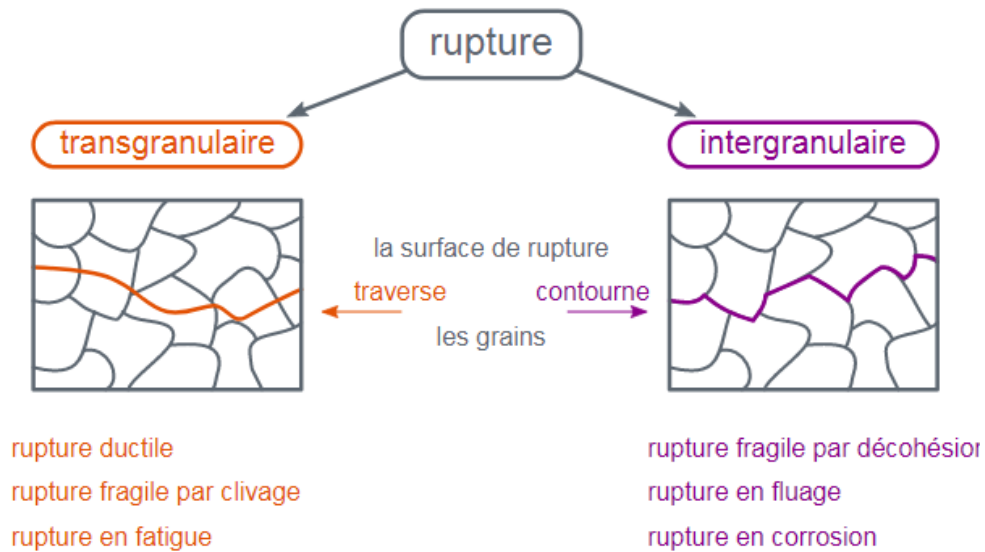
Transgranulaires, c'est le cas de toutes les ruptures ductiles et des ruptures fragiles par clivage

Intergranulaires, c'est le cas des ruptures fragiles par décohésion,

selon que la fissure qui génère la fracture traverse les grains ou les contourne en suivant précisément les joints de grains (voir Fig.)



Classement des ruptures selon leur cinétique



Classement des ruptures selon leur observation

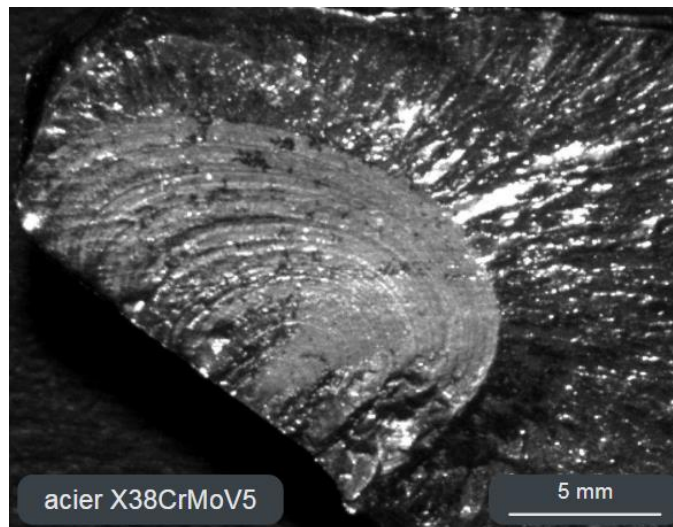
L'analyse fractographique des faciès de rupture en fatigue est excessivement riche d'enseignements. On distingue généralement trois zones correspondant respectivement aux phases successives d'amorçage, de propagation stable et de rupture finale instantanée.

Il est souvent difficile au plan expérimental de connaître précisément les mécanismes d'amorçage des fissures. L'amorçage se fait généralement en surface du matériau ou à des interfaces par exemple entre matrice et inclusions ou encore le long des joints de grains. En surface du matériau, des instabilités plastiques locales sont susceptibles de se produire. La déformation se localise dans des bandes de glissement et le matériau subit des phénomènes d'intrusion (métal repoussé vers l'intérieur) et d'extrusion (métal repoussé vers l'extérieur) donnant naissance à une surface en dents de scie propice à générer une concentration de contraintes (voir Fig.ci-après). Consécutivement à l'amorçage, un premier stade de propagation, purement cristallographique le long des plans atomiques du matériau, se produit. On considère typiquement que la région comprenant l'amorçage et le tout premier stade de propagation s'étend, en relation avec la résolution des techniques expérimentales permettant de l'observer, à quelques grains métallurgiques.

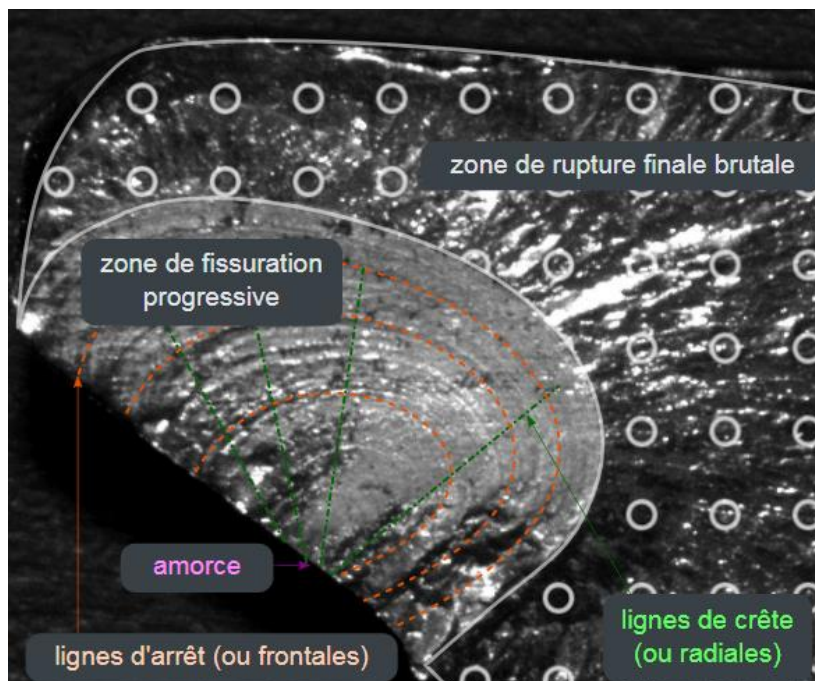
la propagation se poursuit avec un caractère transgranulaire, toujours de manière lente et stable. La surface de rupture est essentiellement plane, elle présente un aspect lisse et soyeux. Macroscopiquement, il est possible de distinguer dans cette région (voir Fig.)

- des lignes d'arrêt (ou lignes frontales) : elles correspondent aux macro-cycles subis par le matériau lors des différents fonctionnements de la pièce et représentent précisément les instants d'arrêt de la fissure.
- des lignes de crête (ou lignes radiales) : elles traduisent un certain écart à la planéité parfaite du faciès en marquant la propagation de la fissure le long de plans cristallins voisins, globalement parallèles mais décalés les uns par rapport aux autres.

En remontant les lignes d'arrêt et les lignes de crête, il est en principe possible de déterminer précisément la zone d'amorçage.



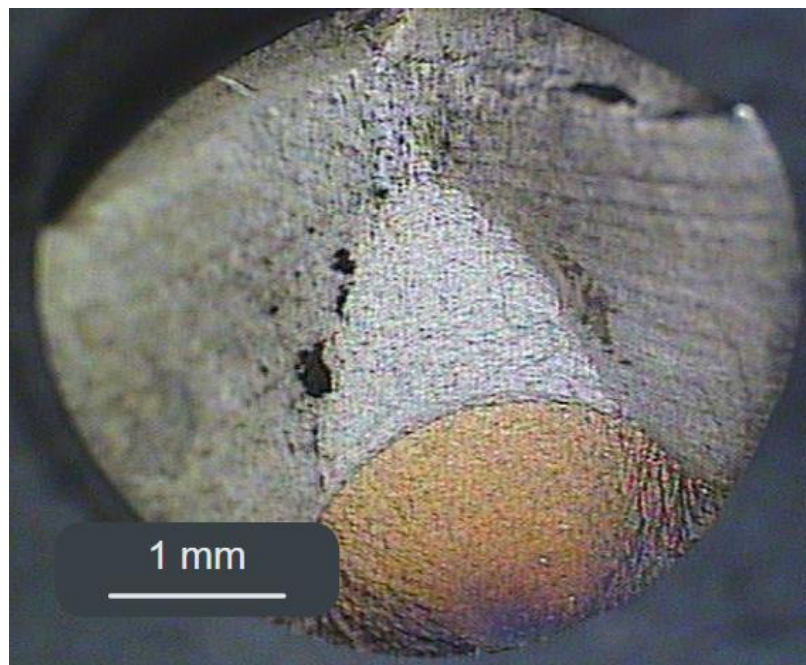
Rupture en fatigue : faciès de rupture en fatigue d'un acier X38CrMoV5



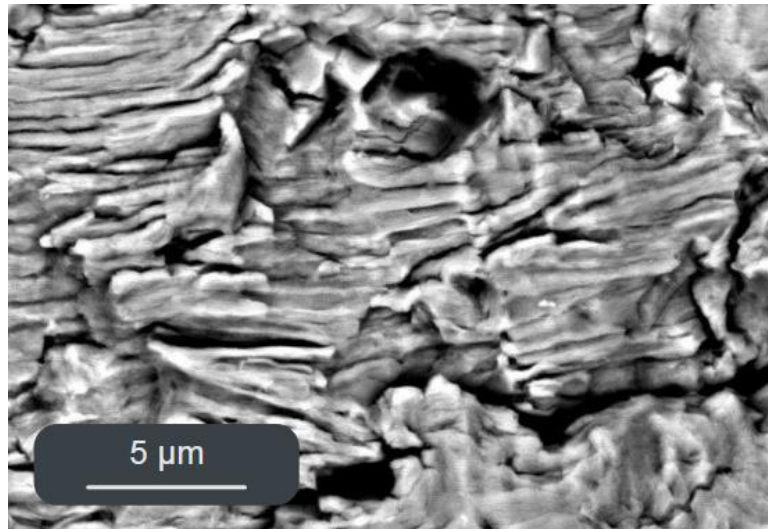
Rupture en fatigue : description schématique de la rupture en fatigue d'un acier
X38CrMoV5

À l'échelle microscopique, il est possible d'observer des stries en relation avec l'oxydation du front de fissure. Chacune de ces stries correspondant à un cycle de fatigue, elles traduisent donc l'avancée élémentaire de la fissure au cours de sa propagation globale. L'analyse par comptage des stries de fatigue fournit de précieux renseignements sur le comportement du matériau. Par exemple, il est possible, grâce à une analyse fractographique détaillée, de déterminer la vitesse de propagation de fissure ou de comparer de manière critique l'historique de la rupture du matériau à la sollicitation mécanique qu'il est supposé avoir subie.

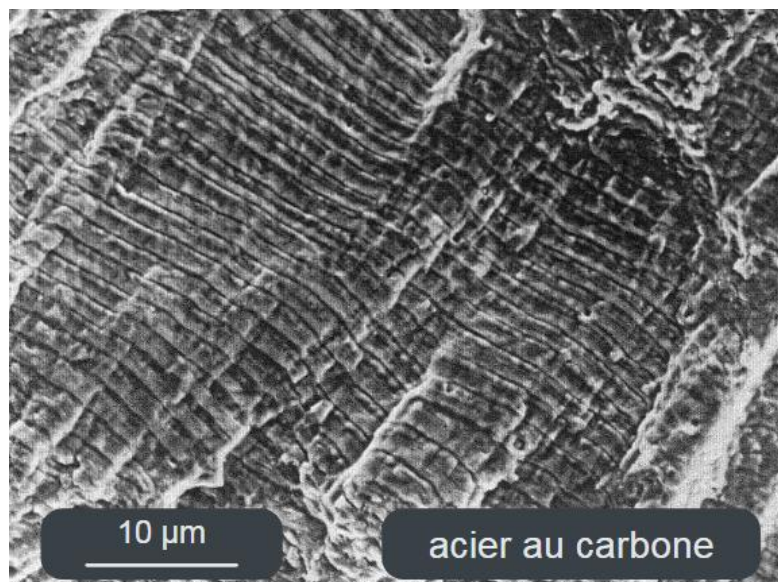
Lors de la phase de propagation lente et stable, la taille de la fissure et les contraintes locales en pointe de fissure augmentent. Il en va de même pour le facteur d'intensité de contrainte. Lorsque celui-ci atteint sa valeur seuil - la ténacité - la fissure se propage de manière brutale. Cette propagation, conduisant à la rupture catastrophique du matériau, est quasiment instantanée et se produit à la vitesse du son dans le matériau (3000 à 5000m.s⁻¹). Le faciès de rupture finale, de type ductile, laisse apparaître un aspect rugueux très facile à distinguer de celui de la région de propagation lente et stable.



Rupture en fatigue : faciès de rupture d'une éprouvette d'IN718 rompue en fatigue
à 550 °C



Rupture en fatigue : stries correspondantes d'une éprouvette d'IN718 rompue en fatigue à 550 °C



Rupture en fatigue : stries de fatigue dans un acier au carbone

Exemple d'endommagement

Ruptures dites semi-fragiles

Quels sont les faciès de ruptures dites semi-fragiles ?

Les ruptures dites semi-fragiles présentent un faciès caractéristique dit à chevrons.

Il est à noter que dans bien des cas l'orientation des chevrons permet de remonter jusqu'à l'amorce de la déchirure semi-fragile.

La forme des chevrons et la géométrie (d'après une coupe perpendiculaire à la surface de rupture) permet en outre de déterminer l'influence des caractéristiques du métal*. On peut dire à ce sujet que l'ouverture des branches et la courbure de celles-ci sont liées à la dimension des grains. Dans les tôles présentant des feuillements on trouve généralement des chevrons « sans pointe »

