

Vers la prévision de la rupture de disque de turbomachine : apport de la corrélation d'image numérique

Dominik LINDNER

Thèse préparée au LMT Cachan et soutenu le 1^{er} juillet 2016 à l'ENS Cachan/Paris Saclay

Table de matières

Introduction	1
Bibliographie	4
Identification de la plasticité à des niveaux de contrainte élevés et pour des éprouvettes hétérogènes en utilisant I-DIC.....	4
Vers l'identification des critères matériels d'échec	5
Perspectives pour la simulation de la rupture.....	6
Conclusion.....	7
La sensibilité à l'état de stress des matériaux	7
Simulations robustes de la rupture	9

Introduction

Dans sa définition la plus générale, une turbomachine sert le transfert d'énergie entre un fluide et un rotor. Différentes classes de turbomachines existent : compresseurs, pompes ou turbomoteurs. Turbomoteurs ou turbines à gaz sont des moteurs à combustion interne en rotation, comprenant un procédé de combustion en continu.

Selon l'application, plusieurs modèles de turbomoteurs existent. Parmi eux, turbopropulseurs font usage d'un rotor externe.

Aujourd'hui, la recherche en turbomachines est entraînée par trois facteurs principaux: la consommation de carburant, la réduction du poids et la réduction des coûts. Par conséquent, les fabricants cherchent constamment d'améliorer la conception. Ces circonstances conduisent à de plus en plus réalistes calculs, qui nécessitent une meilleure compréhension et caractérisation du comportement constitutif des matériaux.

Dans ce contexte, cette thèse se concentre sur les améliorations possibles dans les méthodes de modélisation et de caractérisation du matériau. En outre, les premiers travaux sur les améliorations possibles du calcul d'éclatement ont été faits.

La conception de turbomachines pour les applications aéronautiques doit se conformer aux règles de régulation strictes. La spécification européenne de certification pour les moteurs (CS-E) nécessite l'essai de chaque composant de moteur pour une variété de conditions de chargement. Pour les disques et les roues en rotation, les principaux tests concernent durée de vie, l'intégrité du disque, l'analyse modale et la tolérance aux fissures. Bien que chaque test ajoute des exigences différentes à la

conception, l'évaluation de l'intégrité est peut-être la plus difficile. Le test suppose un événement de rupture hypothétique: la boîte de vitesses reliées à la turbine de puissance peut se briser ou un dysfonctionnement de combustion peut se produire. Dans ce cas, la vitesse de rotation augmente brusquement, dépassant la vitesse maximale et entrant dans ce qu'on appelle le régime de survitesse. Le CS-E exige une protection survitesse électronique, ce qui déclenche l'arrêt de la turbine. En outre, la certification exige une preuve de la stabilité du disque dans le régime de survitesse.

Pour concevoir efficacement le disque, la connaissance de la vitesse de la stabilité finale, la vitesse d'éclatement est nécessaire.

L'estimation de la vitesse d'éclatement peut être évaluée par des critères globaux. Le critère de contrainte tangentielle moyenne proposée par Robinson est l'un des plus utilisés. Dans le cas de géométries complexes et des modèles de matériaux raffinés, ce critère n'est pas assez précis.

Les tentatives récentes misent plutôt sur des prévisions d'éclatement locales. Simulations par éléments finis ont été réalisées, qui prend précisément en compte à la fois la géométrie complexe des disques réels et le modèle de comportement du matériau. De nombreuses études ont été menées sur ce sujet, notamment celui de Mazière, où de nombreux aspects ont été précisément étudiés, par exemple l'effet de viscoplasticité ou possibles instabilités Portevin-Le Chatelier. De l'œuvre de Mazière, il apparaît également que la prévision d'éclatement par des approches locales dépend fortement de la modélisation du comportement constitutif. Pour le matériau étudié, le critère de Hosford a été jugée plus approprié que le critère de von Mises.

Cependant, aucune nette amélioration de la prédiction éclater a été obtenu. Par conséquent, nous cherchons d'autres explications possibles.

Une première est que la modélisation et l'identification des matériaux utilisés ont principalement été effectuées sur la base des tests uniaxiaux et un modèle élastoplastique de von Mises. L'état de stress dans ces tests est caractérisé par un triaxialité d'environ 0,33. En revanche, dans les calculs de disque du triaxialité est de 0,4 à 0,8.

Une deuxième explication possible consiste dans les grandes valeurs de déformation plastique équivalente, qui sont atteintes dans les calculs d'éclatement. Les valeurs se situent dans le régime post-pic des courbes typiques contrainte-déformation. Dans ce régime, hétérogénéités se produisent dans le test de caractérisation en traction. Cela fait une identification classique, qui suppose l'homogénéité du test, inappropriée.

La dernière question concerne l'état de la rupture lui-même. Pour les matériaux utilisés, aucune information claire n'est disponible, soit sur la présence éventuelle de dommages ou de la forme appropriée du critère local.

A partir de ces considérations, nous avons décidé que le progrès devrait être possible sur toutes ces questions en appliquant des techniques de mesure des champs à des essais de traction hétérogènes.

Nous concentrons d'abord sur le stress triaxialité, car il est un paramètre clé dans endommagement et de rupture. Nous avons aussi essayé d'étudier l'influence du choix du critère de plasticité, qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. L'utilisation de plates géométries de traction entaillées donne lieu à des niveaux de stress triaxialité, qui sont plus représentatives de celles rencontrées dans les disques.

Le fait que l'alliage de titane étudié présente une asymétrie importante traction-compression n'a pas tenu compte. En fait, pour les applications d'intérêt, la compression ne se produit pas.

Les géométries de l'éprouvette considérée induisent des champs de contraintes non uniformes. Dans ce cas, la mesure des champs de déplacement dépendant de la charge et de leur exploitation ultérieure sont nécessaires. Des techniques optiques différentes peuvent être utilisées pour mesurer les champs de déplacement. Parmi eux, la corrélation d'images numériques (DIC) est de plus en plus utilisée en raison de sa polyvalence et son applicabilité à `tout 'échelle`' d'observation.

Même si très puissant, DIC souffre de la résolution / résolution spatiale malédiction car il est un problème inverse. En particulier, elle ne permet pas à utiliser d'éléments des tailles arbitrairement petites. Pour les essais analysés, cette limitation se produit pour une taille minimale de l'élément de 60 pixels, en raison de la mauvaise texture. Pour corriger cet effet, il a été décidé de compter sur la DIC intégré (I-DIC). Une approche, qui permet de relier plus étroitement encore les mesures et simulations. Cette technique a été appliquée avec solutions analytique puis généralisé à des solutions numériques.

L'utilisation de ces techniques ont permis la qualification des modèles de comportement pour les niveaux de déformation plastique équivalent jusqu'à 40 %. Ces niveaux sont bien supérieurs au début du régime post-pic dans l'essai de traction sur des éprouvettes lisse, qui est d'environ 10 % pour l'alliage de titane. En outre, ces niveaux de déformation plastique équivalente ont été obtenus pour une gamme de stress triaxialité allant de 0,4 à 0,7.

De même que pour les études existantes, l'analyse de la rupture présentée repose sur le modèle élastoplastique identifié. En outre, nous proposons une analyse basée sur l'image de l'état de stress et des tensions dans le voisinage de la surface de rupture à l'instant juste avant la rupture. Cette analyse a permis de tester différents critères avec une grande quantité de données.

La partie expérimentale de cette thèse et les développements logiciels associés ne nous a pas permis d'aller aussi loin que nous nous attendions en ce qui concerne le dernier aspect, la simulation de la rupture lui-même. Cette partie, qui a été menée en parallèle, est à l'heure actuelle relativement découplée de la constatation expérimentale.

Aujourd'hui, des simulations réalistes de problèmes industriels complexes, y compris toute leur complexité technologique ne peut être faite qu'en utilisant des codes commerciaux. Dans le cas de la simulation de la rupture, deux difficultés se présentent. Le premier concerne seulement la quasi-statique ou les problèmes de la dynamique lente. Dans ce cas, les schémas implicites sont les approches dominantes. Les nombreuses instabilités associées à la fissuration rendent la convergence problématique et parfois impossible. Ici, les techniques du path-following sont obligatoires et sont souvent utilisés en combinaison avec la viscosité. Afin d'assurer la convergence et de la robustesse, les algorithmes explicites peuvent être utilisés. Dans ce cas, les techniques du mass scaling permettent l'augmentation du pas de temps critique. On ne sait pas comment l'utilisation de ces techniques affecte la prédiction de l'échec.

La seconde difficulté réside dans l'apparition d'une dépendance du maillage dans la prédiction de la rupture. La technique la plus répandue pour obtenir maillage des résultats indépendants est celle des modèles non locaux. La mise en œuvre de ces modèles dans le logiciel industriel est lourde et l'identification de ces modèles reste un problème. Une possibilité beaucoup plus facile est le développement d'une version à taux bornée du modèle. Cette approche ne requiert que classique, i.e. locale, les modifications de la loi constitutive. Néanmoins, ces approches ont été beaucoup moins étudiées et dans tous les cas doivent être réalisées en combinaison avec des analyses dynamiques.

Compte tenu de ces deux questions, le chemin proposé est la combinaison de simulations explicites et d'un modèle de taux borné. Cette thèse explore les premières étapes d'une telle approche.

Bibliographie

Les deux matériaux d'intérêt, TA6V et Udimet 500 montrent des déformations plastiques de plus de 10 %. En outre, les résultats de la littérature indiquent que la fracture peut dépendre fortement de l'état de stress et en particulier le triaxialité. En outre, l'application du critère local basé sur l'état de la contrainte pour les calculs de disque a montré une influence significative sur la prédiction d'éclatement. Pour améliorer ces prévisions, il est nécessaire d'étudier le matériau à l'état de contrainte qui se produit dans les disques.

La prédiction d'éclatement menées jusqu'à présent ont été fait en utilisant des modèles constitutifs identifiés sur des éprouvettes de traction lisses. Deux limitations possibles sur ce type d'expériences doivent être considérées. La première est la localisation de contrainte à partir du début de la striction. En conséquence, une identification basée sur des mesures globales peut être effectué que jusqu'à un niveau limité de la déformation. La deuxième limite concerne l'état de triaxialité dans ces expériences qui ne sont pas représentatives de celles qu'on observe dans les disques.

Pour surmonter ces limitations, nous avons décidé de mener des expériences sur des géométries d'éprouvettes de traction non lisses permettant à obtenir des niveaux de la triaxialité beaucoup plus représentatifs. L'utilisation de DIC et techniques I-DIC cible l'acquisition d'autant que possible de l'information locale pertinente à l'égard de l'identification du comportement constitutif et des critères de rupture locale.

Identification de la plasticité à des niveaux de contrainte élevés et pour des éprouvettes hétérogènes en utilisant I-DIC

Ce chapitre présente la conception des expériences pour des essais de traction à des valeurs élevées de la triaxialité et les analyses des tests avec la corrélation d'image numérique intégrée. L'état de triaxialité du disque a été analysé. La gamme d'intérêt se situe entre 0,4 et 0,75. Deux éprouvettes de traction entaillés différentes ont été conçues pour le TA6V et l'Udimet 500: une mince éprouvette avec une gamme de triaxialité de 0,33 -0,5 et un éprouvette d'épaisseur de 0.7 avec une gamme de conception de 0,33 -0,8. Des images de niveaux de gris ont été enregistrées pendant le test.

L'application des méthodes numériques de corrélation d'images aux tests a notamment mis en évidence la différence de la déformation maximale pour les éprouvettes minces et épaisse.

L'importance de l'utilisation de modèles 3D, même pour des éprouvettes minces doit être soulignée. Ces modèles permettent une meilleure identification comme on peut le voir à partir des résidus associés. L'avantage de la I-DIC par rapport aux autres identifications FEMU a été montré à la diminution des résidus de I-DIC permettant l'utilisation de mailles plus fines.

Compte tenu des deux matériaux, les éprouvettes testées ont d'abord été analysées en utilisant un critère de von Mises. Ensuite, les critères de Hill et Hosford ont été identifiés sur une éprouvette mince.

L'étude de TA6V a révélé que la déformation plastique équivalente atteint des valeurs très élevées (près de 40 %). Pour les éprouvettes épaisses, la déformation plastique équivalente maximale atteint à peu près la moitié des valeurs établies sur des éprouvettes minces. Eprouvettes minces et épaisses sont

caractérisées par des valeurs différentes de la triaxialité. Par conséquent, l'influence de ce paramètre sur les critères de la rupture doit être étudiée.

Pour l'Udimet 500 des résultats similaires ont été observés.

En outre, l'étude a mis en évidence des améliorations devraient être étudiés pour augmenter la précision et la fiabilité de la méthode.

Cela concerne d'abord l'application des motifs mouchetés à des zones de gradients de contrainte élevés. Deuxièmement, pour les éprouvettes épais les conditions aux limites doivent être améliorées grâce à une analyse grossière séparée DIC de ces régions ou en profitant de I-DIC et y compris les conditions aux limites à l'identification.

Pour l'analyse des modèles de matériaux, une autre amélioration serait la création d'une grande analyse de I-DIC, qui considère l'ensemble des données d'images enregistrées à partir de quatre caméras. Cela permettrait d'améliorer les conditions aux limites appliquées pour la DIC et I-DIC analyse.

Vers l'identification des critères matériels d'échec

Ce chapitre concerne le comportement de l'échec de TA6V et U500.

Dans une première étape, les fractographies de TA6V et Udimet 500 sont présentés. TA6V rompt de manière transgranular; pas de grains sont visibles. La surface de rupture indique que la nucléation et la croissance des vides sont la principale raison de la fracture trouvée. Aucune indication de dommages macroscopique n'a été trouvée avant la rupture finale. Pour U500, les grains sont visibles et la fracture est intergranular. Par conséquent, dans un premier temps, on suppose que, pour les deux matériaux la rupture du matériau peut être décrite par un critère de manière appropriée. La présence éventuelle de dommages microscopiques est négligée.

Le chapitre se concentre ensuite sur l'utilisation des approches I-DIC en ce qui concerne l'identification des critères possibles de la rupture. Une procédure a été développée pour analyser les domaines de la rupture, en combinaison avec l'image de l'éprouvette fracturée. Les éléments de la surface de fracture sont extraits du modèle EF, i.e. à proximité d'une surface idéalisée. Les données des éléments extraits peuvent ensuite être analysées pour construire un locus de fracture.

Plusieurs propositions de critères de rupture de la littérature ont été testés, à savoir, la déformation plastique équivalente - triaxialité et contrainte principale maximale - déformation plastique équivalente. Un indicateur de dommage a été proposé, qui pondère la déformation plastique équivalente à une fonction de triaxialité.

D'autres solutions ont été étudiées et il semble que le critère de maximum de contrainte principale correspond très bien aux données en gardant à l'esprit qu'une telle analyse doit tenir compte des calculs de plasticité. En outre, il convient de noter que le fait que pour des éprouvettes épais et minces un seul point la valeur limite est attribué à la rupture ; une fois la fissure amorcée, il se propage d'une manière catastrophique.

L'analyse de toutes les données dans le temps et dans l'espace disponible à partir de l'analyse du I-DIC a été effectuée pour confirmer que les critères ne sont pas atteints avant et / ou dans d'autres endroits des éprouvettes testés.

La conclusion précédente, en particulier celle concernant les principaux critères maximaux de stress doit être vérifié sur d'autres cas de test, sur des géométries d'éprouvettes impliquant d'autres et de divers états de stress.

L'exploitation simultanée de quatre caméras pourrait améliorer les résidus d' I-DIC, qui pourrait à son tour conduire à une meilleure identification.

Bien sûr, un pas en avant serait d'analyser le résultat sur la surface de fracture expérimentale et non sur une idéalisée.

Une autre amélioration de la méthode serait la mise en place de ces critères de fracture dans les simulations EF. L'érosion des éléments de la simulation pourrait conduire à une surface de fracture virtuelle. Avec des procédures supplémentaires ces surfaces de rupture peuvent être comparées aux images enregistrées de la fracture. On pourrait également vérifier si une fois que la rupture initiée, il se propage d'une manière catastrophique

En outre, avec une procédure adaptée I-DIC, la fissure peut être recréé dans les images générées par l'ordinateur. Une telle procédure permettrait la corrélation de l'image de fracture avec l'approche de la I-DIC. L'identification de la plasticité et de fracture pourrait être réalisée simultanément. Ceci est similaire aux idées émises par Roux qui a introduit plus d'informations locales à l'identification fonctionnelle.

Un autre point important considère le modèle constitutif identifié. Pour les éprouvettes minces et épaisses les courbes moyennes ne sont pas identiques. Tout d'abord, la raison d'une telle différence doit être étudiée. Dans ce contexte, la sensibilité des zones de triaxialité à des changements minimes dans la loi identifiée doit être étudiée. En second lieu, il devrait être possible d'identifier un modèle constitutif unique pour toutes les éprouvettes d'une identification simultanée.

Avec les améliorations décrites, l'identification du modèle de plasticité et de rupture serait alors une identification « big data ».

Perspectives pour la simulation de la rupture

Ce chapitre explore les possibilités numériques pour fournir une prédiction indépendante du maillage de la vitesse de l'éclatement. L'application d'un modèle d'endommagement, progressive ou fragile, aux éléments finis conduit aux solutions dépendantes du maillage. Une vue d'ensemble sur les techniques qui garantissent des résultats de maillage indépendant est présenté, à savoir, non-local et limitation de taux.

Le modèle à taux de plasticité borné limite le taux de la déformation plastique équivalente. Pour les essais de traction dynamique une comparaison des résultats indépendants du maillage avec des expériences existe dans la littérature. L'influence de la force centrifuge a été évaluée par l'étude d'un maillage axisymétrique d'une épaisseur uniforme simple dans une simulation très dynamique. Cependant, ce cas conduit toujours au même genre de distribution de dommages quelle que soit la taille des mailles. Les différences entre un modèle de dommages non-limitée classique et le modèle de taux borné sont minimales concernant la répartition des dommages. L'épaisseur uniforme associé au calcul axisymétrique et le chargement force centrifuge conduite à l'apparition de dommages au centre du disque et conduire au même gradient indépendamment de la taille des mailles. En conséquence, cet exemple n'est pas très intéressant afin d'étudier la dépendance du maillage.

Par conséquent, un disque avec une entaille a été étudié. A cause de la localisation forte, il a fallu utiliser la suppression de l'élément afin de calculer un maillage avec une résolution plus fine jusqu'à la rupture finale du disque. L'application du modèle de taux borné conduit simulations à maillage indépendants, i.e. la taille des éléments supprimés et fortement endommagé est constante.

Afin d'appliquer le modèle de taux borné, des pas de temps en dessous du pas critique du modèle sont nécessaires. Ceci est en contradiction avec le temps de l'essai d'éclatement. Si en plus la dynamique explicite est utilisée pour éviter les problèmes de convergence, les pas de temps sont encore plus petits et il devient impossible d'effectuer des simulations en temps réalistes.

Un examen sur les techniques du mass et time scaling est fourni. Ces techniques permettent d'accélérer le calcul dans le cas de la dynamique explicite.

Les effets de ces techniques d'accélération sont d'abord étudiés en détail pour un système masse-ressort, puis pour le disque simplifié sous tension. Trois points principaux doivent être remarqués. Tout d'abord, l'utilisation du scaling conduit en général à un changement de la vitesse de l'instabilité vers des vitesses plus élevées dans le cas de chargement centrifuge. En second lieu, l'échelle de temps conduit à une augmentation des taux dans la partie stable du calcul, et d'une manière plus complexe aussi à une augmentation à la vitesse maximale. Le scaling de la masse conduit seulement à une diminution du taux maximum. Troisièmement, il semble que la haute scaling de temps doit être évité en combinaison avec le mass scaling.

En ce qui concerne la définition d'un critère de validation, le critère testé du rapport entre l'énergie cinétique prévoit que toutes les simulations effectuées sont valides. Compte tenu des erreurs existantes dans certaines des simulations cela ne semble pas correct.

En outre, dans le cas du modèle de taux borné que le temps critique doit être modifié en fonction du mass scaling dans l'élément. Enfin, l'examen d'un modèle d'endommagement classique sur le disque avec une entaille a révélé que l'échec quasi-statique des erreurs limites prévisibles est de petite et la diminution possible du temps de simulation est grande.

Conclusion

L'axe principal de cette étude était l'identification du comportement des matériaux TA6V et U500 jusqu'à la fracture sous l'état de contraintes représentatif par rapport à la demande dans les disques de turbomachines et l'identification de l'état local à la rupture. Pour cela, une approche de corrélation d'image numérique intégrée a été utilisée. L'autre axe thématique de cette thèse était la prédiction objective et robuste de rupture avec les dommages mécaniques dans le cadre de simulations explicites pour la quasi-statique et l'étude de l'influence sur la prédiction de différentes techniques du scaling.

La sensibilité à l'état de contrainte

La campagne expérimentale sur le TA6V et U500 a été motivée par des preuves de l'influence de l'état de contrainte sur la plasticité et la rupture.

Il a donc été décidé de procéder, sur le test dédié, une analyse plus détaillée en ce qui concerne la plasticité et la rupture de TA6V et U500. L'un des principaux piliers de cette approche a été l'application de la technique de corrélation d'images intégré. Comme cette méthode est assez récente, la plupart des travaux ont été consacrés au développement méthodologique.

L'état du disque triaxialité a été analysé. La principale plage d'intérêt se situe entre 0,4 et 0,75 . Deux éprouvettes entaillées différents ont été conçus, une mince éprouvette avec une gamme de triaxialité entre 0,33 et 0,5 et une éprouvette épaisse avec une fourchette comprise entre 0,33 et 0,8. Les géométries ont été testées sous tension uniaxiale quasi-statique.

La combinaison de grandes déformations a conduit à la fissuration fréquente de la peinture utilisée pour les mouchetés. Cependant, I-DIC, qui peut être considérée comme très régularisant, confère une robustesse considérable pour l'identification des champs de déplacement et permet d'obtenir des champs de déformation locale en continu, même à la fin de l'essai en présence de fissures locales dans le motif de tachetures.

L'utilisation de I-DIC donne accès à des données qui ne sont pas accessibles pour les mesures de contrainte standard. I-DIC permet de décrire la qualité d'une loi constitutive et le modèle de l'essai à vérifier contre l'évolution enregistrée des données du moucheté et de la force. L'importance de l'utilisation de modèles 3D, même pour des éprouvettes minces a été remarquée. Leur utilisation permet une meilleure identification comme on peut le voir à partir des résidus associés. Sur les éprouvettes testées, la déformation plastique équivalente atteint localement les niveaux de 30 % pour U500 et presque de 40 % pour TA6V, qui est environ trois fois plus élevé que les niveaux obtenus dans des essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes lisses. Jusqu'à ces niveaux de tension, l'analyse de l'essai a permis de valider le modèle d'écrouissage positif de la plasticité. Pour les éprouvettes épaisses, la déformation plastique équivalente maximale atteint environ la moitié de ces valeurs.

La différence de la déformation maximale pour les deux types d'éprouvettes a donné lieu à une analyse détaillée des conditions de rupture sur certaines éprouvettes sélectionnées. Afin de mieux comprendre les causes possibles de l'échec, fractographies ont été effectuées. Pour TA6V, la surface de rupture indique que la nucléation et la croissance des vides sont la principale raison de la fracture trouvée. Toutefois, aucune indication de dommage macroscopique n'a été trouvée avant la survenance de la rupture. Pour U500, une fracture correspond aux phénomènes de rupture fragile typiques. Le fait que des éprouvettes épaisses avec des niveaux élevés de triaxialité a rupture pour les niveaux de la déformation plastique équivalente de la moitié environ celles observées pour les éprouvettes minces, qui ont des niveaux inférieurs de triaxialité, a conduit à l'enquête sur des critères possibles. L'intégration étroite des expériences et des simulations a permis l'analyse de la déformation et les contraintes des éléments proches de la surface de rupture à l'instant juste avant la rupture. Ceci a permis d'essayer différents critères avec une grande quantité de données. Pour cela, un procédé a été développé pour analyser les champs mécaniques I DIC en combinaison avec l'image de l'éprouvette fracturée. Les éléments d'une surface de fracture idéalisée sont extraits selon la fissure sur l'image enregistrée, en supposant que l'extrusion de la fissure à travers l'éprouvette. Les données des éléments extraits peuvent ensuite être analysés pour construire un lieu de rupture et d'examiner les critères de rupture. Plusieurs propositions de critères de rupture de la littérature ont été testées. Il semble que le critère de maximum de contrainte principale correspond très bien les données extrudées. Cela doit être vérifié sur d'autres cas de test, sur des géométries d'éprouvettes impliquant d'autres et de divers états de stress.

Une amélioration de la méthode principale serait la combinaison de toutes les données enregistrées à partir de quatre caméras dans une seule analyse I-DIC. Ces caméras ont enregistré l'évolution sur les quatre côtés de l'éprouvette pendant l'essai. Ce multi-I-DIC doit d'abord conduire à une amélioration des conditions aux limites de ROI. Ces conditions limites peuvent être interpolées à partir des données de surface latérale ou, mieux encore, ajouté à l'identification en vue de reconstituer les conditions aux

limites plus fiables. Une telle procédure devrait améliorer la qualité de l'identification en particulier pour les éprouvettes épaisses. Par ailleurs, il serait intéressant de tester la possibilité d'identifier un modèle constitutif unique pour toutes les éprouvettes d'une identification simultanée. Une telle méthode nécessiterait des développements non évidents, mais permettrait de définir de manière claire le meilleur modèle possible de toutes les informations disponibles. En outre, elle permettrait de valider ou invalider la méthode actuelle, qui définit le modèle identifié comme une moyenne des courbes de durcissement obtenues de plusieurs éprouvettes.

Une étape avant serait l'analyse de la surface de fracture expérimentale et non seulement une surface idéalisée. Ceci devrait être possible, une fois les améliorations décrites en tenant compte des conditions aux limites de la I-DIC sont effectuées. Une autre amélioration de la méthode serait la mise en place des critères de rupture obtenus dans les simulations EF. L'érosion des éléments de la simulation pourrait conduire à une surface de fracture virtuelle. Avec des procédures supplémentaires ces surfaces de fracture virtuelles peuvent être comparées aux images enregistrées de la surface de fracture expérimentale. On pourrait également vérifier si une fois que la rupture initiée, il se propage d'une manière catastrophique. En outre, avec une procédure adaptée I-DIC, la fissure peut être recréée dans les images générées par ordinateur. Une telle procédure permettrait la corrélation de l'image de fracture avec l'approche de la I-DIC. L'identification de la plasticité et de fracture pourrait être réalisée simultanément.

Ensemble avec les autres améliorations pour I-DIC, l'identification du modèle de plasticité et de rupture serait alors un « big data » identification.

Bien sûr, un aspect pratique serait de trouver une procédure qui permet d'éviter la fissuration de la peinture utilisée pour les motifs mouchetés DIC. Cela permettrait une meilleure identification du modèle constitutif proche de la rupture.

Simulations robustes de la rupture

L'introduction d'un taux de dommages local, si elle est utilisée pour prédire la rupture d'une structure, conduit à la dépendance du maillage parasite. En outre, le calcul de la rupture en utilisant des calculs statiques implicites est très difficile et conduit souvent à des problèmes de convergence, même en utilisant des techniques du path following. Une alternative possible est proposée dans cette thèse. Elle concerne l'utilisation d'un modèle de taux borné combiné avec les techniques du scaling pour simuler la rupture d'un test quasi-statique d'une manière objective. L'un des points d'intérêt est qu'un tel modèle ne nécessite pas de développements complexes, comme nécessaires pour les modèles non locaux, car il implique seulement des modifications locales de la loi constitutive.

Le modèle de taux de plasticité borné limite le taux de la déformation plastique équivalente. Comme à l'origine utilisé uniquement pour la dynamique transitoire, le modèle a été testé pour un chargement dynamique du disque. Deux géométries ont été étudiées, à savoir un disque de section transversale uniforme et un disque avec une entaille. Le disque de section transversale uniforme induit la dégradation dans le centre d'où elle se propage progressivement. Cet exemple ne semble pas pertinent pour étudier les problèmes de localisation. Au contraire, pour le disque avec une entaille, la localisation est forte et la dépendance de maillage de la solution a été rencontrée lors de l'utilisation d'un modèle d'endommagement classique. L'application du modèle de taux borné conduit à maillage indépendants simulations; \ I.E. la taille des éléments supprimés et fortement endommagé est constante.

Afin d'appliquer le modèle de taux borné, l'utilisation de pas de temps au-dessous du temps stable du modèle est souvent nécessaire. Pour les expériences d'éclatement ce qui conduit à des simulations impossibles à réaliser dans les temps réalistes. L'idée était donc d'étudier, comme souvent fait pour d'autres applications, les effets des techniques de masse et de temps mise à l'échelle pour l'accélération des calculs explicites.

Trois points principaux doivent être remarqués si les charges centrifuges sont appliquées. Tout d'abord, l'utilisation du scaling en général conduit à un changement de la vitesse de l'instabilité prédite vers les vitesses plus élevées. Cet effet devrait évidemment être contrôlé et limité. Deuxièmement, l'échelle de temps conduit à une augmentation des taux et le scaling de la masse conduit à une diminution du taux maximum. La relation entre ces observations est complexe. Troisièmement, il semble que les facteurs du scaling haute de temps doivent être évités en combinaison avec des facteurs de scaling de masse élevée.

Si aucun calcul implicite n'existe un critère est nécessaire pour valider la procédure. Le critère testé du rapport de cinétique en énergie interne ne semble pas approprié ou tout au moins pas très sensibles aux effets qui se produisent; la valeur de la littérature fournie de 5% semble trop élevé.

Considérant ces résultats plusieurs conclusions peuvent être tirées en ce qui concerne la prédiction de la rupture dans le cas de chargement centrifuge.

En raison du problème de la convergence dans un calcul implicite, l'application de simulations explicites ne permet le calcul des tensions supérieures à la vitesse d'instabilité. Sans application du scaling, il ne change pas la vitesse l'éclatement prédite.

Si les matériaux fragiles sont considérés et on est seulement intéressé par la vitesse de l'éclatement, l'application d'un critère (cassants modèle de dommages) est suffisante. Une panne de disque est presque immédiate après l'échec du premier élément et jusqu'à ce point simulations statiques peuvent être utilisés. Cela change si le chemin de la fissure subséquente est d'intérêt pour la conception et un modèle d'endommagement fragile est appliqué. Comme dans le cas d'un modèle de dommages progressifs, la régularisation est nécessaire. Selon les cas réels de la géométrie et le matériau des temps de simulation résultante peuvent être améliorées grâce à des techniques du scaling.

Pour un modèle de dommages progressifs, la régularisation est obligatoire et conduit à beaucoup plus long temps de simulation à l'aide de la méthode du taux bornée ainsi que des techniques de solutions implicites et par rapport à la durée de solution de simulations statiques maillage dépendant. Cependant, si les calculs explicites sont utilisés, les techniques du scaling permettent une diminution du temps de la simulation. La diminution attendue dans les temps de simulation est grande et l'erreur de vitesse limite reste inférieure à 0.1 %.

Dans une étude future de l'interaction complète du modèle de taux borné et les techniques de mise à l'échelle doit être étudiée. Une fois que ceci est fait la prévision d'éclatement quasi-statique doit être possible, ainsi que le calcul de la rupture quasi-statique dans des essais de traction.