

Cette ressource présente l'utilisation de la corrélation d'images numériques pour l'identification de modèles de comportements mécaniques de matériaux. Pour une présentation générale de la technique, voir la ressource « *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* ».

La corrélation d'images numériques est une technique expérimentale permettant de mesurer un champ de déplacement en comparant les photos numériques d'un objet avant et après déformation. Cette ressource présente l'apport de cette technique aux essais mécaniques réalisés sur des matériaux afin d'identifier les paramètres de leurs modèles de comportements. L'exploitation quantitative des divers modes d'imagerie, aujourd'hui de plus en plus facilement accessibles, permet de réaliser des mesures de grande précision à moindre coût. Une évolution qui gagne également le monde de la mécanique des solides, pour y bouleverser les habitudes de pensée.

1 - Les matériaux

Tous les objets qui nous entourent, du plus familier au plus exotique, sont constitués de matériaux le plus souvent solides, conçus et réalisés pour répondre à de plus en plus d'exigences et de fonctions. Ces matériaux sont de plus en plus sophistiqués, associant des matières différentes dans des architectures maîtrisées, comme dans les composites, couvrant une gamme d'échelles de plus en plus large, dotés de revêtements fonctionnels... bref, d'une complexité croissante, y compris pour des produits largement diffusés. Si seuls ceux affublés de préfixes « nano » ou « bio » sont fortement médiatisés, la plupart bénéficient d'intenses efforts de recherche et d'innovation pour atteindre une qualité, des performances et des fonctionnalités toujours plus importantes ou des coûts d'élaboration de mieux en mieux maîtrisés.

Depuis l'échelle intime du constituant élémentaire, jusqu'à celle du produit fini, l'imbrication des structurations estompe progressivement la notion même de matériau au profit de celle du produit. Ainsi, le banal verre à vitre n'est plus depuis longtemps la matière « verre » mise sous forme de plaques minces : il est couramment revêtu d'un empilement de couches minces pour l'isolation thermique, le contrôle solaire, la fonction autonettoyante, ... puis associé dans une structure (double vitrage pour les fenêtres, feuilleté pour les pare-brise automobiles...).

Mieux encore, l'objet en tant que tel disparaît au profit de la fonction qu'il remplit. Ce n'est finalement pas le verre que l'on achète pour une fenêtre, mais sa transparence, sa tenue mécanique, son isolation thermique et phonique, et qu'importe si, in fine, cette transparence est obtenue à partir de silice et de chaux. Cet effacement progressif de la matière n'est cependant possible que par une connaissance de plus en plus grande de sa structure, son organisation et ses propriétés. Cette tendance de fond historique a été bien saisie, voire en partie initiée, par les grands acteurs économiques du marché des matériaux qui offrent aujourd'hui un panel très large pour se concentrer sur un objectif de « cocktail de propriétés ».

2 - Le comportement mécanique

Parmi ces propriétés, une caractéristique incontournable, au point que son évidence pourrait presque la faire oublier, est la tenue mécanique. Tout produit doit résister aux actions

extérieures subies au cours de sa vie, qu'il s'agisse de son usage propre ou de sollicitations extérieures accidentelles, qu'il soit destiné à supporter des efforts comme fonction principale ou non. Ces actions extérieures sont ressenties au cœur du matériau par ce que la mécanique du solide déformable nomme contrainte, la capacité d'un matériau à supporter ces contraintes caractérisant sa tenue mécanique. Tout le monde souhaite qu'un objet garde sa forme, qu'il ne se brise pas, qu'il ne se raye ni ne s'use... à un tel point que cette fonction mécanique conditionne souvent le dimensionnement de l'objet. Dans d'autres cas, au contraire, on préfère qu'il rompe (sinon, ouvrir une boîte de conserve ou une canette deviendrait délicat !).

A regarder plus finement, on se rend vite compte que la tenue mécanique recouvre en fait beaucoup de choses différentes : bien sûr, sous faibles sollicitations, la plupart des matériaux solides ont un comportement élastique, que l'on va caractériser par une déformation proportionnelle à la contrainte appliquée (comme un ressort parfait où l'allongement relatif est proportionnel à la force de traction). Cependant, lorsque les forces augmentent, la déformation peut devenir irréversible (et l'on parlera de plasticité ou de viscoélasticité), elle peut engendrer des microfissures (endommagement) ou encore donner lieu à une fracture... La formalisation de ces notions en une description mathématiquement et physiquement satisfaisante est tout l'art de la mécanique des solides.

Cette description mécanique repose sur deux piliers : d'une part, une déclinaison adaptée aux milieux continus du principe fondamental de la dynamique que l'on doit à Newton, et d'autre part, une loi de comportement qui décrit la relation entre contrainte et déformation, assortie éventuellement de variables internes qui complètent la caractérisation de l'état du milieu. Autant le premier pilier est indiscutable, autant le second est une affaire de choix : tout matériau montre un comportement complexe lorsque l'on rentre dans les détails, et le plus souvent on ne se propose que d'en décrire les traits les plus saillants. En effet, plus la description est fine, plus elle réclame de nombreux paramètres qu'il est de plus en plus difficile d'apprécier précisément. Nous reviendrons sur cette question.

3 - Loi de comportement

Une loi de comportement a pour objet de rendre compte de la manière dont se déforme un volume élémentaire de solide dans une histoire de sollicitation. L'aspect historique est important car souvent le passé influe très sensiblement sur le présent (par le biais des déformations irréversibles ou de l'endommagement subis par le volume considéré). Elle a l'intérêt majeur d'être intrinsèque, générique et de pouvoir rendre compte de toutes les actions (ou au moins un ensemble représentatif d'entre elles) auxquelles est soumis un volume élémentaire représentatif du milieu. Ainsi il sera possible de prédire le comportement d'un solide de géométrie arbitraire et soumis à des efforts ou des déplacements imposés divers.

Il est donc nécessaire de disposer d'une évaluation quantitative des paramètres de la loi de comportement du matériau de façon à déterminer une géométrie qui garantira une certaine durée de vie à l'objet. De plus, cette quantification doit généralement être validée, d'abord sur des échantillons de géométries simples, puis par des tests sur l'objet dans sa forme finale ou proche de celle-ci. Aujourd'hui, on a également souvent recours à la simulation numérique à des fins de tests virtuels pour diminuer le nombre d'essais effectués dans la phase de conception. Pour quantifier les paramètres d'une loi de comportement, la stratégie classique consiste à concevoir des géométries d'éprouvette (échantillon du matériau à étudier) et des sollicitations telles que les champs de déformation et de contrainte soient les plus homogènes possible. Ainsi, on pourra apprécier, par le biais de quelques mesures locales ou globales, ces états de contraintes et de déformation et donc construire facilement la loi de comportement. La puissance des techniques de mesures de champ est alors de pouvoir aborder le problème de la

mesure de la loi de comportement dans un cadre plus large d'essais mécaniques, sans recourir à une exigence d'homogénéité. Cela est d'autant plus important que la complexification des lois de comportement, aujourd'hui concevable dans le cadre de la simulation numérique, rend très lourd le travail expérimental d'identification des paramètres de ces lois constitutives.

L'enjeu des techniques de mesure de champ de déplacement est d'offrir une opportunité unique de pouvoir exploiter des essais mécaniques non standards, en maîtrisant l'hétérogénéité du champ de déformation et surtout en l'exploitant comme représentant autant de micro-essais mécaniques indépendants que de points de mesure du champ. Cependant, cette exploitation n'est pas à ce jour une démarche habituelle, et clairement des procédures stables et validées doivent être développées pour cette application précise.

4 - Identification

Le cœur du problème n'est que très rarement concentré sur l'évaluation des déplacements en tant que tels. La finalité la plus fréquente est d'appréhender les paramètres intrinsèques (du matériau) qui vont caractériser son comportement mécanique, opération que l'on qualifie souvent « d'identification ». L'identification fait intervenir le cadre générique formel d'une loi de comportement. L'expérience nous a appris à distinguer quelques grandes familles de comportement. Selon le caractère réversible (ou non) des déformations du solide, on parlera d'élasticité (ou d'inélasticité) pour qualifier comportement. Si la vitesse de sollicitation conditionne la réponse du solide on qualifiera son comportement de visqueux... Bref, l'ensemble de ces critères nous conduira à formuler des lois de comportement plus ou moins complexes qui relieront contraintes et déformations (incluant le cas échéant leurs histoires) par le biais d'équations constitutives dont les paramètres sont caractéristiques du matériau étudié. L'identification consiste alors à évaluer ces paramètres à partir d'essais mécaniques.

C'est cette identification qui a conduit à élaborer des tests mécaniques bien balisés qui permettent d'ajuster les paramètres de ces lois à partir de sollicitations contraintes par le faible nombre de mesures cinématiques. Il faudra s'assurer qu'une mesure d'une déformation en un point renseigne de fait sur tout en domaine, et donc le plus souvent l'essai doit être très homogène, ce qui se heurte parfois à des lois rebelles à cette homogénéité (par exemple celles qui donnent lieu à des déformations localisées). Les mesures de champ nous libèrent en grande partie de ce cadre très contraignant et nous offrent la possibilité de pouvoir exploiter des essais imparfaits ou de développer de nouveaux essais. C'est ici encore une véritable révolution culturelle qui va bouleverser dans les années à venir la définition même des tests mécaniques.

La sophistication poussée des lois de comportement alliée à la puissance croissante des ordinateurs, et aux algorithmes puissants développés pour traiter cette complexité croissante nous conduisent aujourd'hui souvent à des situations où le recours à la simulation numérique est indispensable pour pouvoir apprécier le champ de déplacement développé dans un essai. L'identification consiste alors à ajuster les paramètres des lois constitutives pour reproduire au mieux le résultat d'un essai. On conçoit ainsi aisément que les mesures de champ nous posent un nouveau problème : la comparaison entre champs de déplacement mesuré et calculé devient considérablement plus exigeante et donc plus discriminante sur l'identification, mais elle interdit de fait la plupart des approches habituelles fondées sur un faible nombre de mesures, pour nous inviter à un traitement informatique de ces données sous la forme de champs. On perçoit donc l'intérêt de choisir une base de description des champs qui assure une parfaite continuité entre mesure et calcul, comme la base de fonctions de type éléments finis que l'on pourra mettre en œuvre sur ces deux procédures, facilitant ainsi leur confrontation, et minimisant les erreurs additionnelles liées aux traductions entre deux représentations différentes.

La simulation numérique du comportement des solides part habituellement de données d'entrées relatives à la géométrie et aux sollicitations mécaniques, mais aussi à la loi de comportement pour produire différents résultats dont le champ de déplacement. La formulation de l'identification en tant que problème « inverse », consiste à échanger ce sens traditionnel, pour admettre maintenant le champ de déplacement comme une entrée du problème, où les inconnues sont alors les paramètres constitutifs. Nous ne rentrerons pas dans le détail du traitement adapté à ce renversement de perspectives qui devient vite très technique, mais nous nous bornerons à mentionner que différentes méthodes existent, dont certaines sont optimales pour des lois simples, et que dans le cadre général des lois non linéaires de nombreux développements et progrès sont attendus dans les années à venir.

Se dessinent ainsi deux maillons bien distincts qui relient l'un les images acquises lors d'un essai au champ de déplacement, et l'autre ce champ de déplacement aux paramètres de la loi de comportement. Cette courte chaîne permet alors d'entrevoir l'identification comme travaillant directement sur les images dans une démarche où le champ de déplacement n'est plus qu'un intermédiaire, certes utile à l'appréciation de la qualité du résultat, mais sans finalité autre, procédure que nous qualifions « d'intégrée ». Cette fusion comporte, elle aussi, un gain propre : la même démarche est ainsi capable de propager non seulement l'information (ici de nature cinématique) mais aussi son incertitude associée, incertitude que l'on sait apprécier point par point en fonction de la texture locale de l'image : cela permet alors de pallier localement le manque d'information liée à la texture pour la compenser par la connaissance (même approximative) de la loi de comportement. De plus la variété des sollicitations élémentaires rencontrées localement dans un essai inhomogène apportera un ensemble suffisamment riche pour pouvoir apprécier finement de nombreux paramètres. Nous sommes aujourd'hui à la porte de cette révolution pour la mécanique des matériaux.

5 - Quelques applications

La corrélation d'images numériques est fréquemment utilisée lors d'essais mécaniques sur des matériaux, car la mesure de champs de déplacement complets (et non de quantités ponctuelles comme avec des jauges, par exemple) permet d'obtenir une grande quantité d'informations et notamment d'identifier des paramètres de modèles de comportements sans devoir forcément obtenir un état de contraintes homogène. Voici quelques exemples d'applications :

- L'observation de la ruine d'une poutre métallique sous l'effet d'un séisme, et de la localisation des déformations permanentes obtenues. *Voir ressource « Application de la corrélation d'images : ruine d'une poutre métallique en flexion ».*
- L'identification de paramètres élastiques, en l'occurrence du module d'Young et du coefficient de Poisson, lors d'un essai brésilien (compression diamétrale d'un disque). *Voir ressource « Application de la corrélation d'images : identification de paramètres élastiques ».*
- L'observation de la fissuration de divers matériaux, y compris au cœur de la matière et l'identification des paramètres des modèles de fissuration utilisés en mécanique de la rupture. *Voir ressource « Application de la corrélation d'images : la fissuration ».*
- L'observation des dégradations d'une plaque composite sous chargement biaxial, et l'identification de l'endommagement obtenu au cours de l'essai. *Voir ressource « Application de la corrélation d'images : identification d'un champ d'endommagement ».*

Cette sélection n'est naturellement pas exhaustive ...

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>