

ASTER

Dernières nouvelles du Code_Aster • N° 35 • Juillet 2001

échos

Éditorial

de Jean-Raymond Lévesque

Un processus durable

C'est avec un grand plaisir que j'ai accepté de répondre à l'amicale pression du Comité de rédaction pour cet éditorial des dix ans d'ASTER échos : " *tu as carte blanche ... puisque c'est ton dernier* " !

Oserais-je dire que trente six numéros, mis bout à bout, c'est presque aussi long que la tapisserie de BAYEUX. C'est en tout cas un excellent témoignage de cette saga, où développeurs et utilisateurs ont rivalisé de dynamisme pour mettre en lumière le travail collectif. De nombreux lecteurs nous ont fait part régulièrement de leur intérêt pour cette formule, sans webcams et sans bannières publicitaires, qui leur a permis d'en apprendre beaucoup sur ce qui se passait dans le loft !

En relisant certaines pages, je retiendrai que cet outil de modélisation mécanique s'est construit patiemment pour traiter des problèmes concrets : beaucoup de mécanique, toujours du numérique et juste ce qu'il faut d'informatique. L'architecture initiale s'est révélée suffisamment robuste pour permettre, chaque fois que cela était nécessaire, de rajouter une brique nouvelle, d'optimiser un domaine d'utilisation ou de changer complètement un algorithme ou une structure de données ... sans arrêter l'exploitation.

Pour garantir la maîtrise de ce processus d'évolution et de non régression

du code, nous avons pu bénéficier d'un renouvellement continu des équipes, chaque nouvel entrant apportant sa capacité d'innovation, dans une organisation qualité "vivante" et à partir d'une documentation enrichie en permanence.

Pour donner confiance à nos utilisateurs, nous avons pu mener à bien plusieurs opérations de validation indépendante et dégager des ressources pour la formation et l'aide à la modélisation.

Forts du succès de la formule Aster Recherche, un nouveau mode de diffusion sera engagé à l'automne pour bénéficier plus largement du retour d'expérience et des contributions externes. Ne manquez pas le prochain ASTER échos !

C'est avec optimisme que je vois se terminer, mon mandat de pilote des projets 2000-2001. La reconnaissance de la qualité des contributions du Code_Aster aux enjeux d'EDF et du professionnalisme de son équipe de production et de diffusion permettra au Comité de gestion nucléaire d'engager un nouveau cycle de trois ans.

Encore un grand merci à tous ceux qui ont contribué au Code_Aster et longue vie à ASTER échos !

Jean-Raymond Lévesque
Directeur du projet Code_Aster

- Pylônes : simulations EVEREST-Aster et essais
- Soudage : simulation numérique d'un essai

Effet du vent sur éléments linéiques

Surface de contact 3D en éléments quadratiques

Calcul de G-plastique

Structures de contrôle dans les commandes

Code_Aster® :
Code d'Analyse
des Structures
et Thermo-mécanique,
pour des Études
et des Recherches

EDF-PÔLE INDUSTRIE
Division R & D

Effet du vent sur les éléments linéiques

Mieux prendre en compte l'effet de la vitesse de vent sur les éléments tels que les câbles et les poutres

Les mouvements des câbles sous l'effet du vent impliquent la prise en compte de la vitesse relative du câble car le coefficient de trainée C_x de ceux-ci (et des poutres) n'est pas constant en fonction de la vitesse de vent. Par exemple, après la disparition d'une sollicitation dynamique (vent, court-circuit dans des câbles, ...) le mouvement de la structure s'atténue dans le temps. Un amortissement qui est dû en partie à l'effet de la vitesse relative de la structure par rapport à l'air et à l'influence de cette vitesse sur l'effort résistant aux déplacements.

Dans cette nouvelle fonctionnalité,

on lit d'abord le champ de vitesse de vent (LIRE_RESU) : celui-ci est supporté par un nuage de points, et peut dépendre à la fois de l'espace et du temps. Puis on affecte aux éléments linéiques une fonction de la vitesse, décrivant la force répartie s'exerçant sur ces éléments (DEFI_FONCTION et AFFE_CARA_ELEM).

La commande de chargement AFFE_CHAR_MECA affecte le champ de vitesse de vent sur les seuls éléments



linéiques. La vitesse relative, calculée par le Code_Aster, correspond à la différence entre le champ de vitesse de vent projeté sur l'élément linéique et la vitesse de cet élément. La force répartie s'exerçant sur ces éléments est alors évaluée à chaque itération d'un calcul non linéaire, en fonction de la vitesse relative de la structure dans le vent.

J. L. Fléjou

Surface de contact 3D en éléments quadratiques QUAD8 et TRIA6

Un développement qui remédie aux oscillations des contraintes et des déplacements calculés sur les surfaces de contact

L'utilisation du contact avec des méthodes utilisant des multiplicateurs de Lagrange posait des problèmes pour les mailles de bord quadratiques QUAD8 et TRIA6. En effet, en cas de contact, les fonctions de forme de ces éléments ne donnaient pas une pression de contact positive aux nœuds som-

meets des éléments comme pour les éléments linéaires. Or les méthodes d'activation des liaisons de contact reposent sur la positivité de cette pression pour lier cinématiquement entre eux les points en contact. Les points

sommets des mailles ne participaient donc plus au contact ce qui conduisait à des oscillations fortes des contraintes et à des déplacements en dents de scie au niveau de la surface de contact.

On a donc décidé de ne considérer le contact qu'au sommet de ces mailles quadratiques et d'appliquer un déplacement aux nœuds milieux d'un côté moyenne de celui des nœuds sommet du même côté. Ce développement est pour le moment disponible pour les mailles de bord 3D, mais pas pour les éléments de coques à 9 et 7 nœuds dont les fonctions de forme pour le déplacement sont celles de mailles quadratiques QUAD8 et TRIA6. On prévoit de l'étendre dans le courant de l'été à ces éléments.

P. Massin



Calcul de G-plastique



Avec 'ENER_TOTALE', nouveau mot clé de la commande POST_ELEM, on accède désormais à l'énergie de déformation totale et donc au calcul de G-plastique en mécanique de la rupture

L'extension de la théorie de Francfort-Marigo à la plasticité a récemment été proposée pour la formulation d'un taux de restitution d'énergie appelé G_p (G-plastique) applicable en mécanique de la rupture élastoplastique avec prise en compte des éventuelles décharges. Le calcul de G-plastique requiert la connaissance de l'énergie de déformation totale de la structure à un instant considéré. Il est alors

nécessaire de calculer la variation de cette énergie entre deux pas de temps correspondant à une propagation fictive de la fissure d'une distance Δl . Le taux G_p s'obtient en divisant cette variation d'énergie totale par Δl . L'utilisateur doit donc réaliser deux calculs pour chaque incrément de chargement. Un premier (commande STAT_NON_LINE) avant propagation de la fissure puis un second en libérant une ou plusieurs liaisons nodales correspondant à une propagation de fissure de Δl . Ce dernier calcul, non automatique, est en effet, pour le moment, à la charge de l'utilisateur.

Avec la nouvelle fonctionnalité Aster, on obtient l'énergie de déformation nécessaire à l'établissement du paramètre G_p en comportement élastoplastique avec un critère von-Mises isotrope. C'est le rôle du nouveau mot clé 'ENER_TOTALE' de la commande POST_ELEM. Ce calcul d'énergie s'applique au groupe de mailles désiré. Le mot clé 'ENER_ELAS' qui permet d'accéder à l'énergie élastique est également disponible. Ces deux énergies, déjà calculées auparavant, n'étaient pas accessibles à l'utilisateur. Actuellement en validation, un développement réalisera ce calcul pour tout type de comportement (seul le comportement 2D isotrope linéaire élastoplastique ou avec courbe de traction étant présentement couvert).

S. Granet, Y. Wadier

Des structures de contrôle dans les commandes

On peut dorénavant utiliser des boucles et des tests dans les fichiers de commandes Aster

Le nouveau langage de commande du Code_Aster s'appuie sur PYTHON qui est aussi un langage de programmation. Toute instruction PYTHON est donc *a priori* licite dans un fichier de commandes Aster. Réaliser une séquence d'opérations tant qu'un critère n'a pas été atteint, récupérer le contenu de tables dans des variables PYTHON sont maintenant possibles en version 6.

Un exemple de calcul mécanique (cas test ZZZZ121a) montre des adaptations successives d'un maillage initial par le logiciel HOMARD jusqu'à ce que le déplacement en un point ne varie plus à un critère près. La séquence de commandes des affectations, du calcul mécanique et de l'adaptation de maillage n'est plus écrite qu'une seule fois dans une

boucle dont on sort par un test. Celui-ci porte sur la valeur d'un déplacement extrait au préalable dans une table. La structure de données de type table est la passerelle de récupération des valeurs calculées par Aster dans des variables PYTHON. Les structures de données itérées (le résultat mécanique, le maillage ...) sont stockées sous forme de tableaux ; elles sont exploitables pour chaque indice une fois sorti de la boucle. Si un gain de place mémoire est recherché par écrasement à l'itération $n+1$ de la structure de données d'indice n , on peut utiliser la commande DETRUIRE en étant très vigilant sur l'interdépendance de ces structures



de données.

Une restriction : les structures de contrôle sont incompatibles avec l'éditeur EFICAS qui ne

peut ni produire ni relire un fichier de commandes en contenant. Enfin, l'utilisation des boucles et des tableaux de structures de données requiert l'usage du mot-clé PAR_LOT='NON' dans la commande DEBUT. En cas de besoins, n'hésitez pas à contacter l'Equipe de Développement Aster pour vous aider à exploiter ces nouvelles possibilités du langage de commande.

C. Durand

En bref...

Votre repère, cylindrique ou cartésien ?

La commande `MODI_REPERE` effectue le changement de repère pour le dépouillement de champs de vecteurs ou de tenseurs, en milieux continus 2D ou 3D. Le nouveau repère peut être cylindrique ou bien cartésien, il se définit par un axe et une origine et se déduit du repère du calcul par 3 rotations. Les champs spécifiés du résultat sont transformés et sont utilisables dans des commandes d'extraction (`POST_RELEVE_T`) ou d'impression (`IMPR_RESU` pour la visualisation)

J.M. Proix

EFICAS : version 1.1 annoncée ...

... fin juin 2001. Au menu : anomalies de la version 1.0 corrigées, lecture et écriture de commentaires entre commandes, copie de mots-clés facteurs, performances accrues, portage sur machine locale UNIX ou NT. Ces évolutions de l'éditeur de commandes Aster dont le cahier des charges provient du retour d'expérience de la version 1.0, intègrent les souhaits des utilisateurs de la première heure. Merci, aux "essuyeurs de plâtre" pour leurs critiques constructives, leur indulgence et ... leur patience !

F. Roucayrol

Mise à jour des versions locales

Ces versions sur plates-formes Win NT, UNIX, issues des stabilisations semestrielles des versions d'Exploitation (Version 5.6) et de Développement (Version 6.1) centralisées, seront disponibles respectivement les 1er et 15 juillet 2001. Aster-Education, destiné à l'enseignement, s'appuiera sur la version d'Exploitation 5.6. Avec Aster-Recherche, les laboratoires et les partenaires de recherche disposeront des évolutions de la version de Développement 6.1, avec notamment le nouveau Superviseur. Se renseigner à : code-aster@edf.fr

M. Courtois

Gb et son "max du max"

La forme bilinéaire (en champs de déplacement) du taux de restitution d'énergie G est maintenant disponible uniquement en 3D dans la commande `CALC_G_LOCAL_T`, de même que sa valeur maximale pour chaque nœud du fond de fissure (ces valeurs calculées de G max sont des majorants). C'est l'option `'CALC_G_LOCAL_MAX'` de la macro commande `MACR_ASPIR_CALC` qui détermine le "max du max" de G et l'abscisse curviligne correspondante.

J. Anglès

Post traitement du contact

Création d'une structure de données de type `val_e_cont` pour les résultats issus d'un calcul avec du contact exploitable sous `POST_RELEVE_T`. Sont accessibles pour le nœud esclave : la valeur du jeu entre le nœud esclave et la surface maître, les incréments de glissement dans les directions tangentes spécifiées par l'utilisateur dans `APPE_CHAR_MECA` sous les mots clés `CONTACT` ou `LIAISON_UNIL_NO`, les valeurs des réactions normales et tangentielles, le rapport norme réaction tangentielle sur norme réaction normale.

P. Massin

Agenda des formations

- Introduction à l'utilisation : 2-3-4 octobre 2001, 29-30-31 janvier 2002
- Calculs dynamiques : 20-21-22 novembre 2001
- Post-traitements : 27-28 mars 2002
- Statique non linéaire : 18-19-20 juin 2002



Vie du projet

www.code-aster.org

Le site internet du *Code_Aster* ouvrira ses pages fin juin 2001. Portail unique d'accès aux informations et ressources concernant le *Code_Aster*, il offrira des rubriques sur les produits et versions, la démarche Qualité, la documentation, l'actualité des développements, la vie du projet ou encore les services proposés. Dans un premier temps, ce site ne sera accessible que depuis l'intranet EDF.

M. Courtois

Retour sur la Journée Aster ...

... du 8 mars dernier sur le centre EDF-R&D de Clamart. Des chiffres : 180 participants, un tiers d'extérieurs à EDF (bureaux d'ingénierie, industriels, labos de recherche) et 50 % de renouvellement des participants. Parmi les exposés : panorama des fonctionnalités de la Version 5, (nouveautés en contact/frottement, refonte des solveurs linéaires, pilotage, outil métier "piquage", valeurs propres par l'algorithme de Sorensen, EFICAS), des applications industrielles EDF traitées avec *Aster* (fissuration transverse de rotors de turbo alternateurs, étanchéité de joint de clapet dans circuit primaire). L'intérêt des études présentées et la qualité des intervenants font le succès de cette manifestation. Que ces derniers en soient remerciés.

M. Courtois

Nouveautés et mises à jour plus vite documentées

Les fonctionnalités modifiées et/ou ajoutées dans la version de développement (actuellement V6) n'attendent plus la stabilisation du code en version d'exploitation pour être documentées. Le *Code_Aster* engage une politique de publication de ces matériaux documentaires à chaque stabilisation semestrielle avec un circuit de relecture allégé. Réclamés par les développeurs et les utilisateurs avancés, ces documents prendront place sur le Serveur documentaire *Aster* en rubrique "Doc Version de Développement" à partir du 01/07/2001 où 40 documents seront disponibles.

M. Boin

Dix bougies pour ASTER échos

Le n° zéro est né en juin 91. Une idée de Pascal Mialon, alors responsable du développement *Aster*. Une livraison concoctée par Anne-Marie Donore responsable, à l'époque, de la rédaction. "Réussir au delà du n°0 n'est pas si simple" écrivait Jean-Raymond Lévesque signataire de l'édition. Et de terminer par : "rendez-vous à la rentrée et longue vie à *ASTER échos*". Souhait exhaussé avec le concours d'Isabelle Vautier aux commandes de la rédaction à partir de février 1995 (n° 14). Les 36 parutions du journal du *Code_Aster* sont consultables sur le serveur intranet documentaire *Aster*, rubrique ARCHIVES (www.code-aster.org).

M. Boin

Arrivée et départ ...

Aimery Assire (thèse au CEA sur la fissuration à haute température) a rejoint l'équipe *Aster* en mars 2001. D'abord, responsable la conception et de la réalisation du portail internet d'accès aux ressources *Aster*, il se consacrera ensuite à l'optimisation des éléments de structures, notamment pour les besoins d'expertise sismique dans *Aster*. Serge Nicolet, quitte ses fonctions de responsable du Club des Utilisateurs *Aster* et part à la Direction EDF Ingénierie et Services (CIPN Marseille). Il avait notamment en charge les études sur la fissuration transverse des rotors et la supervision de la validation indépendante du contact. *ASTER échos* remercie Serge pour sa contribution au code et à l'animation de son Club des Utilisateurs.

F. Waeckel

Version 5 : encore plus de documentation ...

... pour couvrir cette version d'exploitation. Manuel de Référence : un Manuel riche de 110 documents (2300 pages) dont 32 nouveaux documents écrits pour la version 5 et 15 révisions de documents existants en version 4. Manuel d'Utilisation : une restructuration de l'espace documentaire pour un classement plus fonctionnel des commandes (dont celles d'échanges avec d'autres logiciels et des outils métiers), un effort de complétude sur les modélisations (notamment THM et génie civil). On notera un article sur un exemple simple d'utilisation du *Code_Aster* et un nouveau guide de lecture de la documentation d'utilisation. Un manuel de 272 documents (2350 pages) dont 197 dédiées aux commandes (160 dans la version antérieure). Des manuels disponibles électroniquement avec moteur de recherche et sous forme de livre de poche (6 tomes) sur demande.

M. Boin, P. Massin

EDF - Recherche & Développement

1 avenue du Général de Gaulle
BP 408 - 92141 Clamart Cedex France
Tél. : 01 47 65 43 21 • Fax : 01 47 65 41 18



Responsable de la publication : Jean-Raymond Lévesque • Responsable de la rédaction : Michel Boin (01 47 65 49 07, michel.boin@edf.fr) • Illustration : Didier Bosselut • Comité de rédaction : Eric Champain, Mathieu Courtois, Georges Devès, Patrick Massin, François Waeckel • Réalisation : Coulon (75) • Copyright EDF-Recherche & Développement 2001

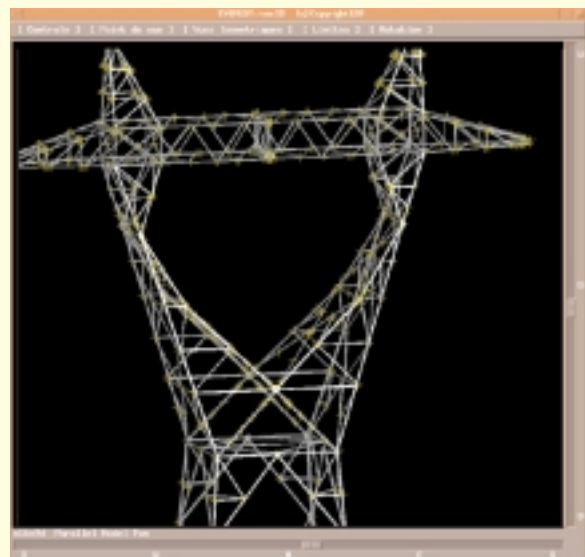
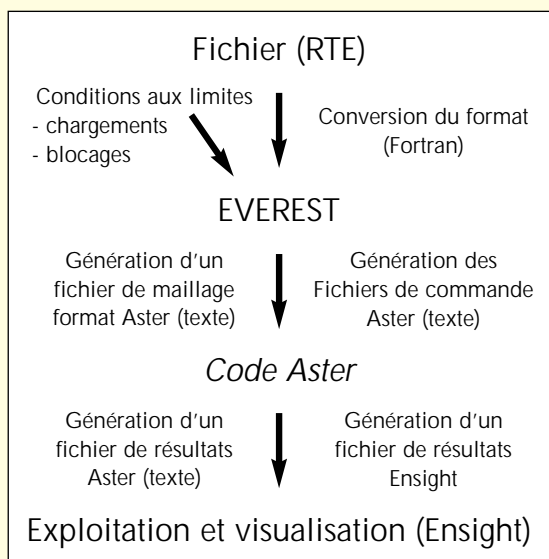
EVEREST et Code-Aster : un couple au service du calcul du renforcement des pylônes

Une étude numérique et expérimentale qui met en évidence les potentialités de prévision de ruine des structures treillis

Cette étude rentre dans le cadre du renforcement des lignes électriques suite à la tempête de décembre 1999. La réglementation concernant les pressions de vent a changé, celles-ci passent de 480 Pa à 570 Pa. Pour répondre à ces nouvelles valeurs et dans un souci de fiabiliser le réseau, certains types de pylônes doivent être renforcés. Ceux de la famille

Nappe 47 ont été les premiers à être re-vérifiés. La validation des renforcements est réalisée par l'essai du pylône à la station EDF-R&D de Sens (Yonne) et par des simulations numériques avec le Code_Aster. Cette double étude, numérique et expérimentale, doit permettre à terme la validation de ces renforcements par des études numériques seules.

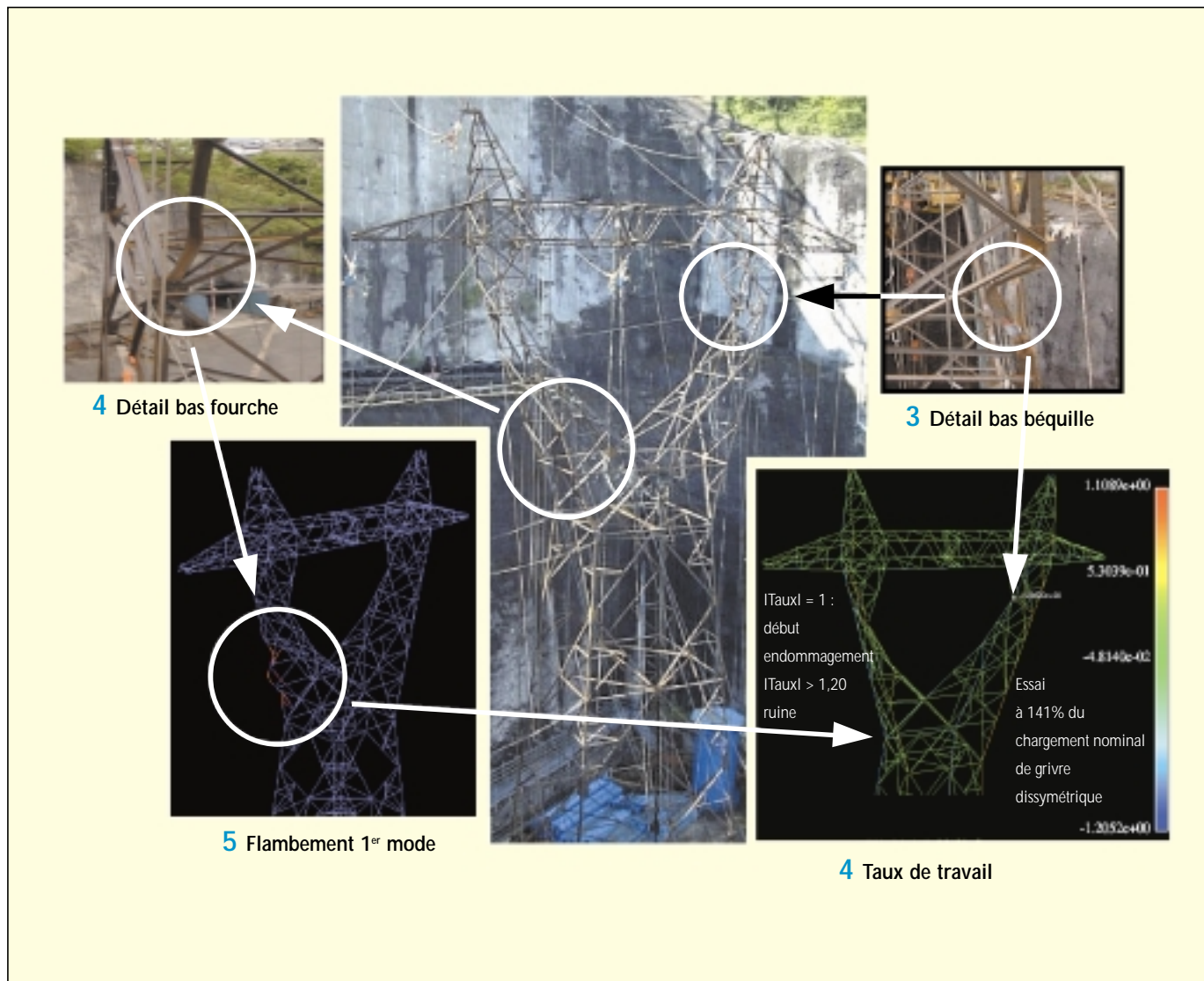
Les outils utilisés sont EVEREST (Evaluation et VERification de la RESistance des Structures Treillis) (1) et le Code_Aster. EVEREST, interface spécifique développée pour les pylônes (2), génère les fichiers nécessaires au Code_Aster à partir de la géométrie de la structure treillis : le maillage ainsi que les modèles éléments finis, l'affectation des caractéristiques mécaniques et la traduction des chargements.



1 Déroulement d'un calcul avec le couple EVEREST-Code_Aster

2 Fenêtre graphique d'EVEREST

EVEREST et Code-Aster : un couple au service du calcul du renforcement des pylônes (suite)



Les cornières, modélisées par des poutres droites de Timoshenko avec gauchissement sont pourvues d'un comportement élasto-plastique avec écrouissage non linéaire. Les assemblages, tels que les goussets et/ou boulons, font l'objet d'une modélisation par des éléments discrets. Les simulations avec les chargements expérimentaux ont permis d'obtenir la charge, le lieu, et les modes de ruine avant essais.

Les tests ont eu lieu en mai 2001 sous des hypothèses de chargement de givre dissymétrique et de vent, sans kit de renforcement puis avec ce kit jusqu'à la rupture. Celle-ci est intervenue entre

140 % et 145 % de la charge de givre dissymétrique, au bas de la béquille ainsi qu'au bas de la fourche. Détails photos (3) et (4). La figure (4) (visualisation par Ensign) montre la répartition dans le pylône du taux de travail (rapport contrainte "équivalente"/ limite élastique) prévu par le Code_Aster à 141 % de la charge nominale sous sollicitation de givre dissymétrique. Le taux maximum (-1,20) se situait au bas de la béquille. La rupture lors de l'essai semble s'être initiée à cet endroit avant d'entraîner un flambement au bas de la fourche (Photo 4), taux de travail égal à -0.92), correspondant au premier mode de flambement calculé par le Code_Aster (5).

Les valeurs obtenues par les jauges de déformations permettent de mesurer l'effort normal et les moments fléchissants dans les cornières jaugées et de les comparer aux efforts obtenus avec Code_Aster.

Cette étude met donc en évidence les potentialités de prévision de ruine des structures treillis avec le couple EVEREST-Code_Aster. Elle démontre aussi le besoin d'améliorer la modélisation des assemblages boulonnés dont l'influence sur les modes et charges de flambement est très importante. ■

Simulation numérique d'un essai de soudage sur tube en 13 passes

Cette étude, réalisée dans le cadre d'actions coopératives EDF-CEA-Framatome, vise le calcul thermo-mécanique de 13 passes de soudage en bidimensionnel axisymétrique et la confrontation des résultats du calcul à des valeurs d'essais. La maquette expérimentale équipée d'un dispositif de soudage instrumenté est un tube cylindrique (acier inox austénitique forgé 316L) avec chanfrein médian au fond duquel 13 passes de soudure de même matériau sont déposées par le procédé TIG (1).

On mesure au cours des essais : les températures en des points proches de la zone soudée, les déplacements de la zone du chanfrein après chaque passe, les contraintes résiduelles en peau externe. La modélisation des cordons de soudure dans leur géométrie courbe réelle compte 3632 nœuds et 1213 éléments quadratiques (2).

Calculs thermiques

On adopte un comportement non linéaire complet : propriétés fonction de la température, hypothèse de convection et de rayonnement à la surface extérieure, prise en compte des chaleurs latentes de changement d'état liquide-solide. La source de chaleur est appliquée volumiquement dans le métal déposé et est variable en temps et constante en espace. Avec les hypothèses précédentes on effectue un calcul thermique non linéaire transitoire, passe par passe, suivant strictement le plan des essais. Les phases de refroidissement entre chaque passe respectent les temps mesurés. L'apport de matière en fin de passe est pris en compte par ajout, à chaque passe, dans le modèle thermique, des éléments finis correspondant à la modélisation de la passe, auxquels on applique la source de chaleur

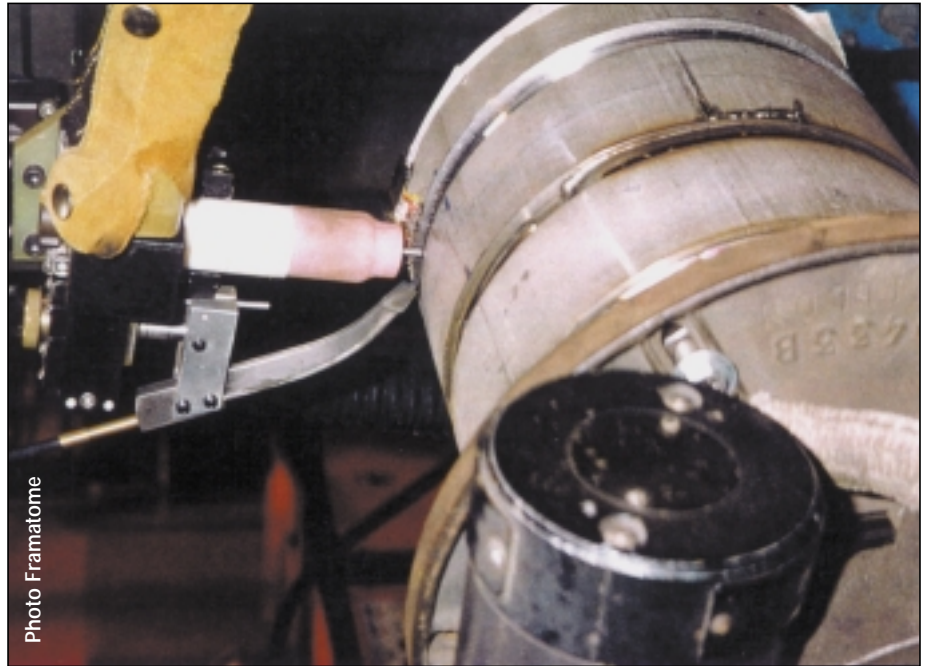


Photo Framatome

1 Maquette tubulaire pour soudage TIG

précédemment définie. Les modèles thermiques sont donc "emboîtés".

Calculs mécaniques

La relation de comportement est élasto-visco-plastique (relation `META_VNL` dans *Aster*), avec écrouissage isotrope non linéaire et restauration visqueuse de l'écrouissage. On effectue les calculs en petites déformations et grands déplacements (option `PETIT_REAC` de `STAT_NON_LINE`).

La modélisation étant axisymétrique, la soudure est déposée sur toute la circonférence en même temps avec libre dilatation et contraction du tube. Dans la réalité, la partie de structure froide exerce un bridage de la zone soudée dont la modélisation axisymétrique ne permet pas de rendre compte. Cet autobridage s'estompe quand la chaleur diffuse et disparaît lors du refroidissement. On remédie à cette

lacune de modélisation, en bridant axialement le tube dans la phase de chauffage.

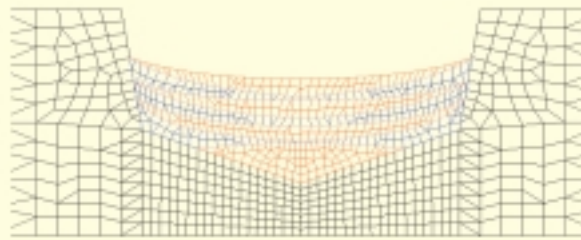
Pour l'accrochage des cordons de soudure, la technique adoptée diffère de celle de la thermique : le modèle comprend dès la passe 1 les 13 cordons, les 12 derniers étant désactivés en leur affectant un module d'Young quasi-nul. Ces cordons sont accrochés au premier cordon et à la structure de façon à ce qu'ils se déforment avec ces derniers. Au fil des passes, on active un à un les cordons en leur restituant leur vrai module d'Young. Ainsi, il n'y a aucune liaison entre groupe de nœuds à gérer, ce qui facilite la mise en données. Autre avantage : cette technique permet de réactualiser la géométrie au terme de chaque passe sans remailler les cordons non activés puisqu'ils sont présents dès

Simulation numérique d'un essai de soudage sur tube en 13 passes (suite)

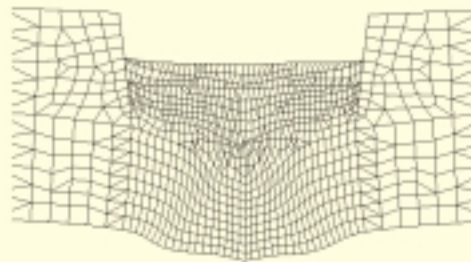
le départ et se déforment avec le maillage. En pratique, il faut veiller à la faible déformation de ces cordons, sinon il faudrait les remailler ; ce qui n'est pas advenu durant ces calculs. La déformée finale (échelle 1) montre néanmoins des déplacements importants (3). Les contraintes résiduelles de von Mises sont données en (4).

Résultats

Au fil des passes, le chanfrein se rétracte. On note la bonne concordance calculs-mesures sur les déplacements cumulés des bords du chanfrein (5) et sur les contraintes résiduelles (2 séries de mesures à 2 azimuths différents) en fin de passes 5, 9 et 13 (on ne dispose de mesures que du côté libre) (6). Près du chanfrein, les valeurs sont assez voisines, par contre, les contraintes expérimentales s'annulent plus vite que celles calculées et présentent même d'importantes valeurs négatives. Néanmoins les allures globales des courbes calculs/mesures se retrouvent.



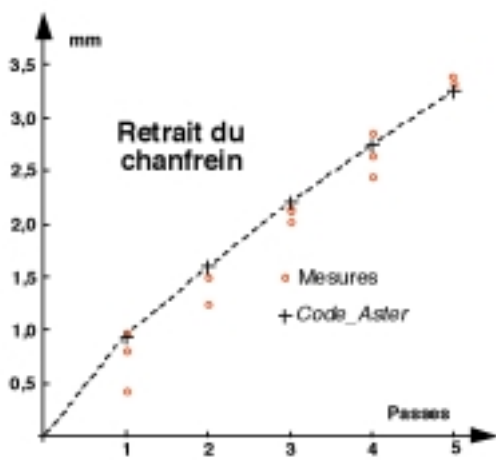
2 Maillage des cordons de soudure dans le chanfrein



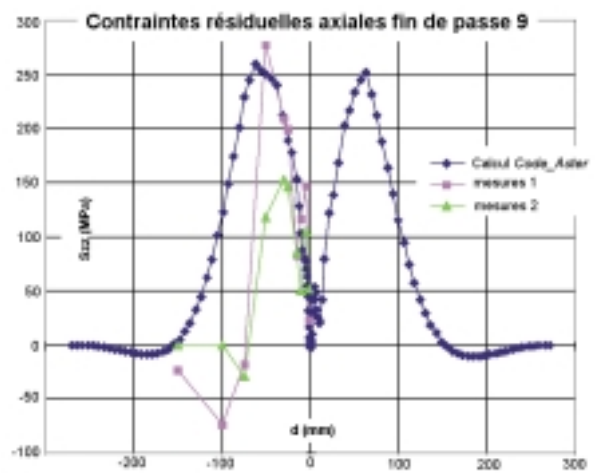
3 Déformée après les 13 passes de soudure



4 Contraintes résiduelles de von Mises



5 Retrait du chanfrein



6 Contraintes résiduelles axiales fin de passe 9