

chocs **avancées 2014**  
Avancées scientifiques et techniques de la direction des applications militaires

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

# SOMMAIRE

## ÉDITORIAL

02 T. MASSARD

## ÉLECTROMAGNÉTISME

04 **Antenne dipôle Log-Périodique imprimée**  
J.-C. DIOT, J.-L. LASSERRE, A. CHAULOUX, F. COLOMBEL, M. HIMDI,  
P. POULIGUEN

## INTERACTION LASER-MATIÈRE

06 **Diffusion Brillouin stimulée et autofocalisation dans des plasmas en détente**  
S. HÜLLER, D. PESME, P.-E. MASSON-LABORDE, S. DEPIERREUX,  
P. LOISEAU, C. LABAUNE, H. BANDULET

## PHYSIQUE DES PLASMAS

08 **Démonstration expérimentale des performances de cavités rugby sur OMEGA**  
F. PHILIPPE, V. TASSIN, P. GAUTHIER, P.-E. MASSON-LABORDE,  
M.-C. MONTEIL, S. ROSS, H.-S. PARK, B. LASINSKI, P. AMENDT

10 **Modélisation cinétique de l'allumage en FCI: une approche multi-échelle**  
B. PEIGNEY, O. LARROCHE, V. TIKHONCHUK

12 **Coefficients de transport et pression hors équilibre thermodynamique local**  
G. FAUSSURIER, C. BLANCARD, P. COSSE

## MÉCANIQUE DES FLUIDES

14 **Évaluation de modèles aux tensions de Reynolds pour l'interaction de mélanges turbulents avec des chocs**  
J. GRIFFOND, O. SOULARD

## PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

16 **Calcul des tensions de surface des liquides métalliques**  
E. BOURASSEAU

## PHYSIQUE NUCLÉAIRE

18 **Mesure des spectres de neutrons prompts émis lors de la fission du  $^{239}\text{Pu}$**   
A. CHATILLON, G. BÉLIER, T. GRANIER, B. LAURENT, B. MORILLON, J. TAIEB,  
R.C. HAIGHT, M. DEVLIN, R. O. NELSON, S. NODA, J.M. O'DONNELL

20 **Excitations nucléaires  $\beta$  et  $\gamma$  dans la même boîte**  
S. PÉRU, S. HILAIRE, E. BAUGE, M. MARTINI

## PHYSIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

22 **Treize ans d'observations des ondes de gravité en Afrique**  
E. BLANC, T. FARGES, A. LE PICHON, P. HEINRICH

## INSTRUMENTATION & MÉTROLOGIE

24 **Influence de la pureté spectrale sur la calibration des analyseurs optiques X du LMJ**  
S. HUBERT, V. PRÉVOT

## SCIENCE DES MATÉRIAUX & CHIMIE

26 **Augmentation des Capacités d'Adsorption du Xénon par dopage à l'argent d'une Zéolithe – Rôle des Nanoparticules d'Argent**  
L. DELIÈRE, S. TOPIN, S. DE VITO

28 **Résistance cohésive des bétons en dynamique rapide**  
B. ERZAR, P. FORQUIN

30 **Compositions énergétiques nanostructurées sûres**  
A. WUILLAUME, A. BEAUCAMP, F. DAVID-QUILLOT, C. ERADES

32 **Comportement atypique et vieillissement statique du tantale**  
D. COLAS, S. FLOURIOT, E. FINOT, T. PARIS, S. FOREST, M. MAZIERE

34 **Application des sulfones dans la formulation d'électrolytes pour batteries Li-ion à base de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ : étude des interfaces**  
J. DEMAUX, M. LE DIGABEL, H. GALIANO, E. DE VITO,  
B. CLAUDE-MONTIGNY, M. CAILLON-CARAVANIER, D. LEMORDANT

36 **Étude de la phase  $\sigma$  dans l'acier 316Nb**  
A. PERRON, F. BUY, E. SUZON, C. TOFFOLON-MASCLET, F. CORTIAL,  
V. VIGNAL, P. PETIT

38 **Capteurs chimiques revêtus de calixarènes pour la détection d'explosifs**  
P. MONTMEAT, F. VEIGNAL, L. HAIRAUT, C. METHIVIER, C.-M. PRADIER

## CALCUL NUMÉRIQUE

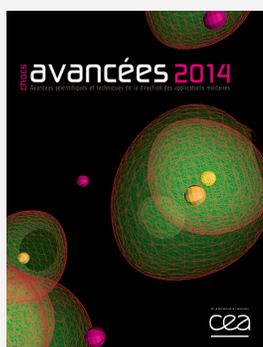
40 **Écoulements hypersoniques en atmosphère raréfiée – Raffinement local de grille en vitesses**  
C. BARANGER, J. CLAUDEL, N. HÉROUARD, L. MIEUSSENS

42 **Simulation d'électrons de très basse énergie pour la microélectronique**  
M. RAINE, P. PAILLET, M. GAILLARDIN

44 **Optimisation des opérations collectives dans les applications MPI+OpenMP**  
A. MAHÉO, W. JALBY, P. CARRIBAULT, M. PÉRACHE, J. JAEGER

46 **Réponses vibratoires non-linéaires**  
M. CLAEYS, J.-P. LAMBELIN, B. ALCOVERRO, J.-J. SINOU

## PRIX ET DISTINCTIONS, LIVRES PARUS, HDR



### Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

**Chocs Avancés 2014.** Avancées scientifiques et techniques de la Direction des applications militaires.

**Image de couverture:** Simulation d'un plasma détendu de silice  $\text{SiO}_2$  à 10 000K (silicium: rose, oxygène: jaune) – ©/CEA/DAM

**Directeur de la publication:** Thierry MASSARD. **Coordinateur scientifique:** Daniel MALYS.

**Comité scientifique:** Daniel BOUCHE, Pierre BRUGUIÈRE, Jacques CAGNOUX, Catherine CHERFILS, Jean CLÉROUIN, Jean-François CLOUET, Gilles DAMAMME, Patrick DAVID, Philippe DUVIGNAC, Francis HARDOUIN, Denis JURASZEK, Christophe LÉLOUP, Stéphane LOUBIÈRE, Daniel MALYS, Christophe MOULIN, Bruno SCHEURER, Philippe SIMONETTI.

**Rédacteur en chef:** Jean-Marc LABORIE.

**Création et réalisation:** EFIL/wwwv.efil.fr. **Impression:** Gibert & Clarey. **Secrétariat, diffusion et abonnement:** Régis VIZET.

Chocs Avancés

CEA/DAM

Institut supérieur des études du nucléaire de défense (ISENDé)

Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon cedex

Tél: 33 (0)1 69 26 76 98 - Fax: 33 (0)1 69 26 70 80

E-mail: chocs@cea.fr

Brochure imprimée sur papier écogéré  
ISSN 1961-7399

# Comportement atypique et vieillissement statique du tantale

D. COLAS - S. FLOURIOT / CEA – Valduc

E. FINOT - T. PARIS / Laboratoire Interdisciplinaire Carnot, UMR 5209 CNRS – Université de Bourgogne, Dijon

S. FOREST - M. MAZIERE / Centre des matériaux, Mines ParisTech, Évry

Le comportement mécanique du tantale de pureté commerciale présente en traction un pic sur la courbe contrainte =  $f(\text{élongation})$ , ce qui est un comportement atypique. Ce comportement intervient dans les premiers stades de déformation plastique du matériau et si l'on s'intéresse aux sollicitations cycliques subies en fatigue, il est crucial d'en comprendre les mécanismes. Cet article présente les caractérisations menées afin de mettre en évidence l'origine de ces mécanismes. Ces caractérisations ont également permis d'identifier un modèle de comportement mécanique simple restituant ce comportement atypique.

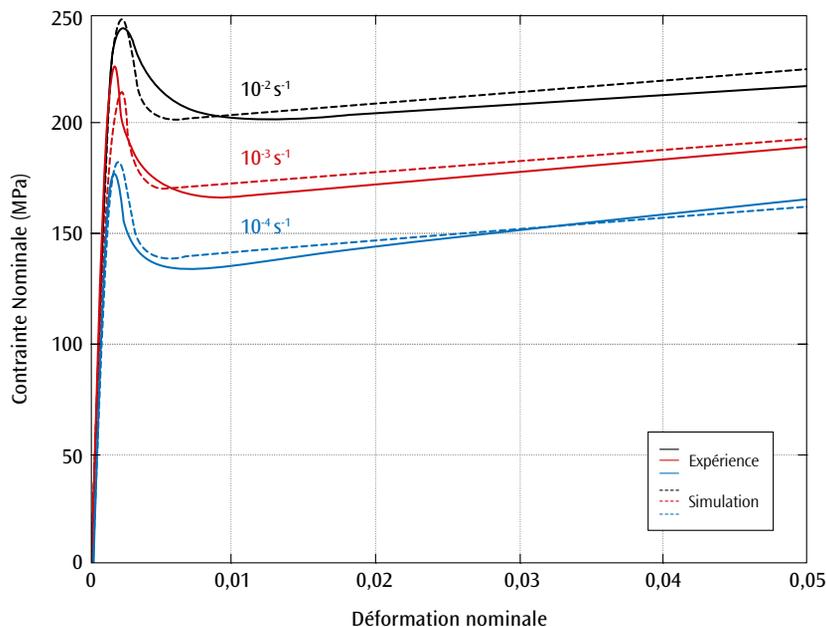
Dans bon nombre de matériaux, le passage du comportement élastique au comportement plastique est caractérisé par une instabilité connue sous le nom de phénomène de Lüders. Dans les aciers faiblement alliés notamment, un pic de traction prononcé est observable sur les courbes de traction. Ce pic est suivi d'un plateau associé à la propagation d'une bande de localisation le long du fût de l'éprouvette. Ce phénomène est également observé dans le zirconium et le titane pur, mais le pic de traction est de faible amplitude. Ce phénomène est attribué à l'ancrage des dislocations par l'atmosphère de solutés.

Le travail présenté ici s'intéresse au tantale, matériau réfractaire. Celui-ci a fait l'objet de nombreux

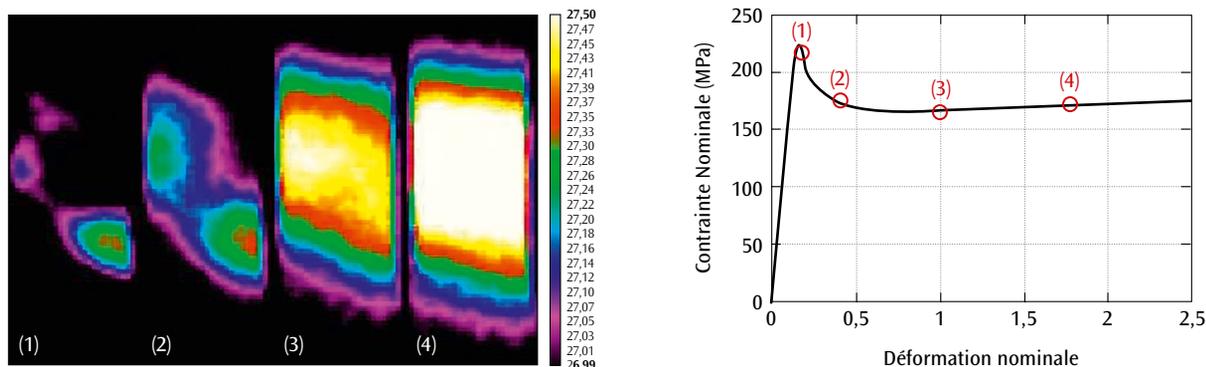
travaux de recherche sur son comportement mécanique dans les dernières décennies, mais la plupart de ces travaux portent sur le comportement à grande vitesse et/ou grande déformation [1]. Ce travail cherche quant à lui à étudier le comportement mécanique du tantale sur les premiers stades de déformation, où peu d'études ont été réalisées.

## Résultats expérimentaux

La **figure 1** montre le comportement à température ambiante pour trois vitesses de déformation. Elle met en évidence une forte dépendance à la vitesse de déformation, mais également un pic de traction. La forme de ce pic est différente de celles observées



**Figure 1.** Courbes de traction du tantale à température ambiante entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  et restitution du comportement par le modèle EKMC.



**Figure 2.** Champs de température mesurés et réponses mécaniques obtenues sur une éprouvette lors d'un essai de traction à température ambiante et à la vitesse de déformation de  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ .

sur d'autres matériaux tels que l'acier. En effet, ce pic est moins brutal. De plus dans le cas de l'acier, il est associé à la propagation d'une bande de déformation plastique le long de l'éprouvette. Or, dans le cas du tantale, la propagation de la bande est plus diffuse comme le montre l'analyse par thermographie infra-rouge (**figure 2**). Une faible augmentation de température de 0,5 K est observée au moment du passage à la contrainte maximale. Une bande diffuse germe et se propage le long de l'éprouvette. La présence d'un pic large et d'une bande de localisation diffuse sont dues à la forte sensibilité à la vitesse du matériau.

Ce point a été confirmé par des observations au microscope électronique à balayage faites lors d'essais interrompus. En effet des lignes de glissement ont été observées à la surface de l'éprouvette dans la bande de localisation. Les observations ont pu mettre en évidence l'avancée de la bande de localisation [2].

Enfin des essais séquentiels consistant à solliciter le matériau puis à le décharger et à attendre une période avant de le solliciter à nouveau ont montré un pic de traction à chaque nouvelle sollicitation. Ce résultat montre qu'il s'agit bien d'un mécanisme de vieillissement statique qui est mis en jeu.

### Modélisation

La modélisation choisie est basée sur des lois empiriques proposées par Estrin, Kubin et McCormick (EKMC) [2,3]. Ce modèle est capable de rendre compte du pic de traction dû au vieillissement statique et du phénomène de Portevin Le Chatelier, c'est-à-dire du vieillissement dynamique [3]. L'originalité de ce modèle est l'introduction d'une variable  $t_a$  qui représente le temps laissé aux atomes présents en solution dans le matériau pour diffuser le long des dislocations. Un terme d'érouissage (contrainte) isotrope

est donc introduit prenant en compte ce terme de vieillissement.

Le modèle de comportement identifié permet de restituer des chargements mécaniques monotones et cycliques jusqu'à des taux de déformation de 10 % (**figure 1**).

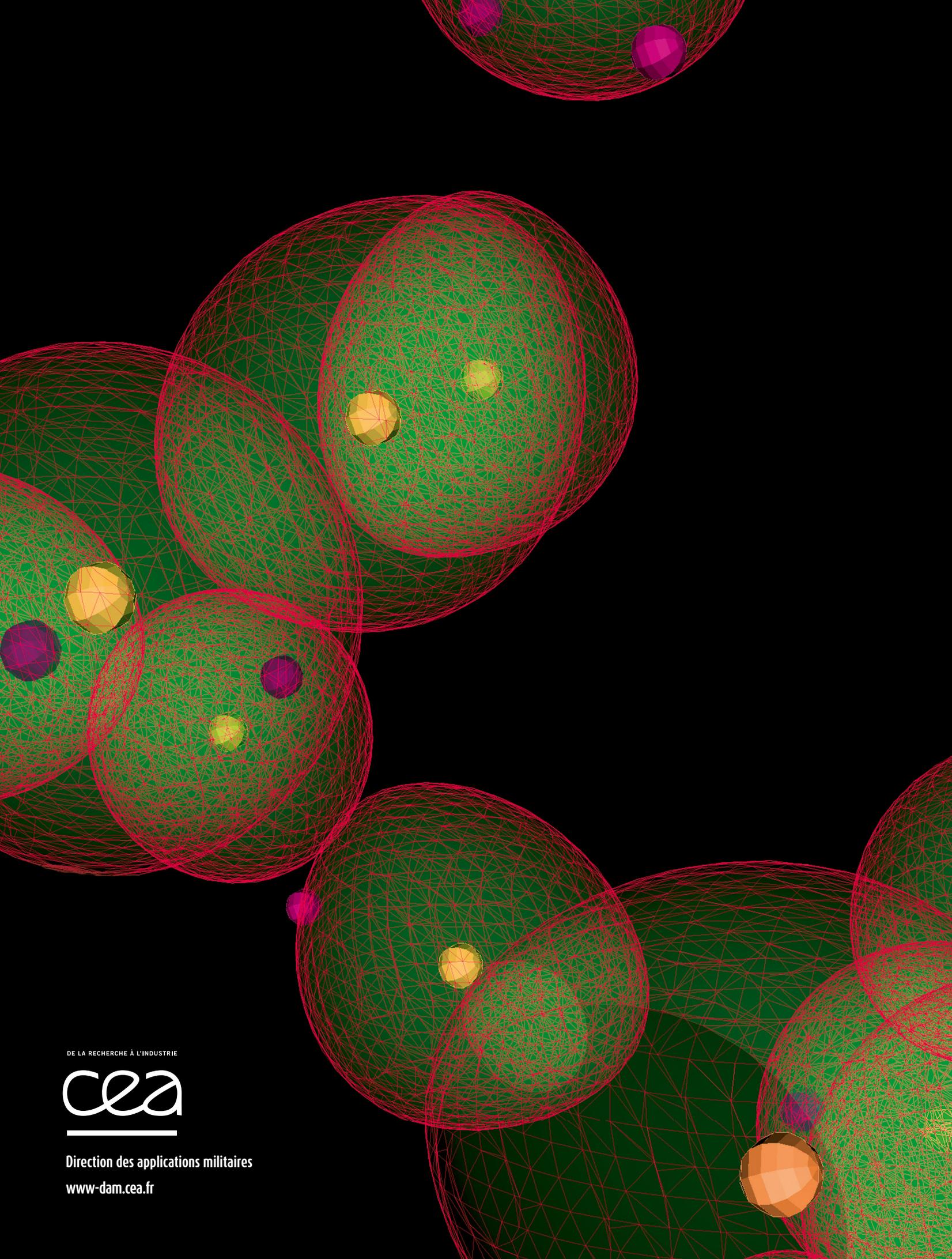
### Conclusion

Les essais mécaniques réalisés ont mis en évidence un comportement plastique atypique qui se caractérise par un pic de contrainte en début d'écoulement plastique et la propagation d'une bande de déformation plastique diffuse. Ce comportement est induit par un mécanisme de vieillissement mettant en jeu l'interaction entre les dislocations et les atomes d'oxygène en solution solide dans le matériau.

Un modèle de comportement phénoménologique a été identifié à température ambiante pour des essais monotones et cycliques. La réponse globale est en bon accord avec les données expérimentales. Les calculs par éléments finis permettent de rendre compte des phénomènes de localisation observés.

### Références

- [1] S. NEMAT-NASSER, J.B. ISAACS, M. LIU, "Microstructure of high-strain, high-strain-rate deformed tantalum", *Acta Mater.*, **46**, p. 1307-1325 (1998).
- [2] D. COLAS, E. FINOT, S. FLOURIOT, S. FOREST, M. MAZIÈRE, T. PARIS, "Investigation and modeling of the anomalous yield point phenomenon in pure tantalum", *Mater. Sci. & Eng. A*, **615**, p. 283-295 (2014).
- [3] S. GRAFF, S. FOREST, J. STRUDEL, C. PRIOUL, P. PILVIN, J. BÉCHADE, "Finite element simulations of dynamic strain ageing effects at V-notches and crack tips", *Scripta Mat.*, **52**, p. 1181-1186 (2005).



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Direction des applications militaires

[www-dam.cea.fr](http://www-dam.cea.fr)