

Etude de fiabilité en fonction du temps de conteneurs de stockage de déchets radioactifs de haute activité

A. Persoons^a, P. Beaurepaire^b, A. Chateauneuf^a, F. Bumbieler^c

a. Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000

Clermont-Ferrand, France. Email : augustin.persoons@uca.fr

b. Andra, 1 Rue Jean Monnet, 92290 Châtenay-Malabry, France

Résumé :

Dans le cadre du projet français de centre de stockage géologique profond des déchets radioactifs (Cigéo) il est prévu d'encapsuler les déchets de haute-activité dans des conteneurs de stockage en acier. Le rôle du conteneur est d'isoler le déchet de l'environnement pendant au moins 500 ans. Les phénomènes tels que la corrosion et le chargement mécanique vont affecter la durée de vie du conteneur. La prédiction et la modélisation de ces phénomènes sont soumises à des incertitudes. Cet article présente le développement d'un modèle du système permettant la prise en compte des incertitudes sur l'évolution des conditions environnementales en situation de stockage et leur propagation à l'évolution du conteneur. Il est basé sur un modèle éléments finis du système prenant en compte les évolutions temporelles du processus de corrosion et du chargement. Le modèle intègre le comportement élastoplastique du matériau et une loi d'endommagement ductile. L'étude consiste à évaluer le modèle pour un nombre fini de pas temps jusqu'à défaillance du système. Le fonctionnement du modèle est illustré par la propagation des incertitudes sur différentes grandeurs de sortie.

Mots clefs : fiabilité, incertitudes, couplage mécano-fiabiliste, éléments finis, comportement élastoplastique

1 Introduction

Cigéo est le projet français de centre de stockage géologique de déchets radioactifs. Dans le cadre de ce projet, le confinement des déchets radioactifs est assuré par l'action combinée de barrières manufacturées et des barrières géologiques. Les déchets de haute activité (HA) sont scellés dans des conteneurs en acier non-allié et leur stockage est prévu dans des micro-tunnels horizontaux. La fonction principale du conteneur est d'isoler le déchet de l'environnement pendant au moins 500 ans, la durée nécessaire à la réduction suffisante de la radio-toxicité et de la température [1].

La durée de vie du conteneur en service est affectée par différents phénomènes tels que la corrosion et le chargement mécanique. Ces phénomènes sont soumis à des incertitudes liées aux problématiques d'extrapolation sur de longues périodes, à la nature multi-physique du problème et à la quantité limitée de retour d'expérience. Ces incertitudes sur les conditions de stockage entraînent des incertitudes sur la durée de vie du conteneur. Les méthodes de fiabilité fournissent un cadre adapté à l'étude de ce problème et n'ont pas encore été déployées pour l'étude du conteneur. Elles doivent être associées à un modèle du système permettant la variabilité des paramètres incertains et dont le temps d'évaluation permet l'emploi de méthodes de fiabilité.

Deux types d'incertitudes sont considérés dans ces travaux et sont traitées différemment. Lorsque les incertitudes concernent des événements possédant un ensemble fini de réalisations, elles sont considérées comme des scénarios possibles et sont étudiées indépendamment. Le second type concerne les incertitudes sur les valeurs des grandeurs physiques caractérisant chaque scénario. Elles sont prises en compte à l'aide de variables aléatoires continues et traitées à l'aide des méthodes de fiabilité.

Dans les travaux présentés dans ce papier les méthodes de fiabilité sont associées à un modèle éléments finis dont la géométrie et le chargement dépendent du temps. Lorsque les méthodes de fiabilité sont associées à un modèle numérique le temps de d'évaluation de ce dernier est une contrainte majeure [2–4]. Afin de limiter le temps de calcul, le modèle est évalué pour un nombre fini de pas temps jusqu'à la ruine du conteneur. Le comportement plastique du matériau est intégré en considérant des cycles itératifs de chargement/déchargement associés à la réduction itérative par corrosion de l'épaisseur.

Dans ce papier sont d'abord présentés le système à modéliser et les contraintes liées aux conditions de stockage et à leur évolution. Sont ensuite détaillées les stratégies de modélisation permettant la prise en compte des incertitudes, de l'évolution de la géométrie et du chargement mécanique et enfin et les phénomènes irréversibles induits par la plasticité et l'endommagement. Enfin le couplage mécano-fiabiliste est illustré par la propagation des incertitudes en entrée à travers le modèle.

2 Description du problème

Les infrastructures de stockage sont prévues à 500 m de profondeur au milieu d'une couche géologique argileuse assurant le confinement à long terme de la radioactivité [1]. Les alvéoles dans lesquelles les déchets HA seront stockés consistent en des micro-tunnels équipés d'un chemisage en acier. Un matériau cimentaire est injecté à l'extrados du chemisage pour en limiter la corrosion à court terme. Les déchets sont conditionnés en colis constitués du conteneur contenant une enveloppe en acier inoxydable dans lequel le déchet vitrifié est préalablement coulé. Le système complet fonctionne comme un système de poupées russes comprenant de l'intérieur vers l'extérieur : le déchet, l'enveloppe, le conteneur, le chemisage, le matériau cimentaire et la roche (figure 1).

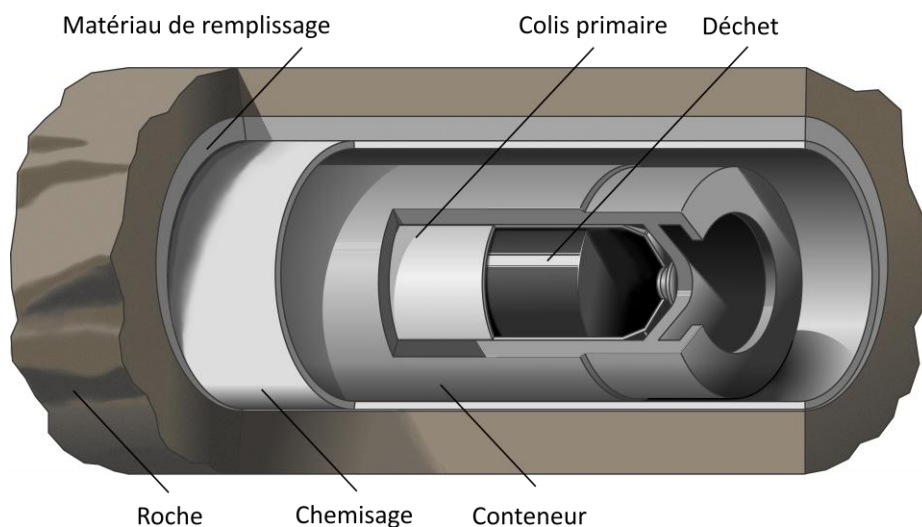


Figure 1 Représentation schématique du système étudié

Un des enjeux majeurs du projet Cigéo concerne la récupérabilité des colis de déchets. L'objectif est de garantir que pendant le premier siècle de service le retrait des déchets reste possible. L'alvéole et la galerie d'accès sont fermées après cette période. Un système d'extraction empêche l'eau provenant de la roche de remplir l'alvéole pendant la phase de réversibilité. Après cette phase, l'alvéole se remplit progressivement d'eau. Le processus de corrosion produit des gaz, cela entraîne, qu'à long terme, un équilibre s'établit entre les pressions des phases gazeuses et liquides dans l'alvéole. La hauteur d'eau stabilisée dans l'alvéole dépend de cet équilibre et elle est incertaine, la prise en compte de cette incertitude est détaillée en section 3.1.

Le choix de l'acier non-allié pour le conteneur induit un mode de corrosion généralisée qui est plus prédictible que la corrosion localisée. Les milieux gazeux et liquides induisent deux taux de corrosion distincts C_g et C_e respectivement. Les taux de corrosion dépendent du temps et leur évolution est définie comme suit : pour assurer le conservatisme de l'étude, des taux de corrosion plus élevés sont considérés pendant la phase d'exploitation réversible de manière à prendre en compte une possible arrivée d'oxygène depuis l'extérieur de l'alvéole avant sa fermeture définitive. Les taux de corrosion sont considérés constants pendant les cent premières années. Ils suivent ensuite une décroissance linéaire suivie d'une décroissance asymptotique tendant vers la valeur stabilisée à long terme. Ces trois phases sont définies par trois paramètres : le taux de corrosion initial, à 120 ans et la valeur à long terme stabilisée. Des incertitudes affectent les processus de corrosion, le traitement de celles-ci est détaillé en section 3.1.

Une fois l'alvéole fermée la pression dans celle-ci va augmenter jusqu'à atteindre un équilibre avec la pression interstitielle de la roche de 5 MPa [5] (on néglige dans cette étude l'effet du transitoire thermique sur l'évolution de pression interstitielle). De plus le processus de corrosion affecte également le chemisage dont l'épaisseur fonctionnelle diminue avec le temps. Étant soumis à la pression de la roche, le chemisage finit par flamber et entrer en contact avec le conteneur. La surface de contact par laquelle la pression de la roche est transmise au conteneur dépend du temps et augmente jusqu'à complètement recouvrir le conteneur. Le chargement mécanique est donc composé d'une pression fluide et d'une pression de contact dépendant du temps et incertaine.

Un contact prématuré entre l'eau et l'enveloppe pourrait entraîner une dégradation accélérée de la matrice du déchet vitrifié [6]. La défaillance du conteneur est définie par la perte de son étanchéité. Le scénario de défaillance étudié dans ce papier est associé à un mode de rupture ductile et la fiabilité du système est estimée. Un des principaux enjeux est la transmission de l'historique de chargement associée à l'évolution de la géométrie et du chargement. Le cas d'une rupture de type fragile (en cas de sensibilité de l'acier P285NH à la corrosion sous contrainte en situation de stockage) a été traité dans une étude antérieure [7].

3 Modélisation du système

Le comportement mécanique du conteneur est modélisé par éléments finis et la corrosion est considérée comme une réduction de son épaisseur. Ce modèle doit rendre compte de l'évolution de la géométrie induite par le processus de corrosion, ainsi que de l'évolution du chargement. Il doit permettre la variabilité des paramètres incertains et le temps d'évaluation doit être compatible avec l'utilisation de méthode de fiabilité.

3.1 Modélisation des incertitudes

Comme introduit en Section 1, deux types d'incertitudes sont considérées dans cette étude et sont traitées différemment. Certaines incertitudes concernent des événements possédant un ensemble fini de réalisations. Ces événements sont par exemple un équilibre entre deux phénomènes physiques antagonistes dont il est difficile de prédire lequel prévaudra sur l'autre. Chaque réalisation est appelée scénario et est étudié indépendamment des autres. Les incertitudes affectant des valeurs prises par les grandeurs physiques et dont les réalisations sont définies sur un intervalle sont modélisées par des variables aléatoires et traitées par les méthodes de fiabilité.

La hauteur d'eau en régime permanent est incertaine car l'équilibre entre les pressions des phases liquides et gazeuses est difficile à prédire. Face à ces incertitudes, trois scénarios sont envisagés : l'alvéole reste remplie d'eau après l'arrêt du système d'extraction des fluides, la pression de gaz entraîne une baisse du niveau jusqu'à assèchement de l'alvéole, les pressions des phases liquides et gazeuses atteignent un équilibre stabilisant la hauteur d'eau à une valeur intermédiaire (figure 2).

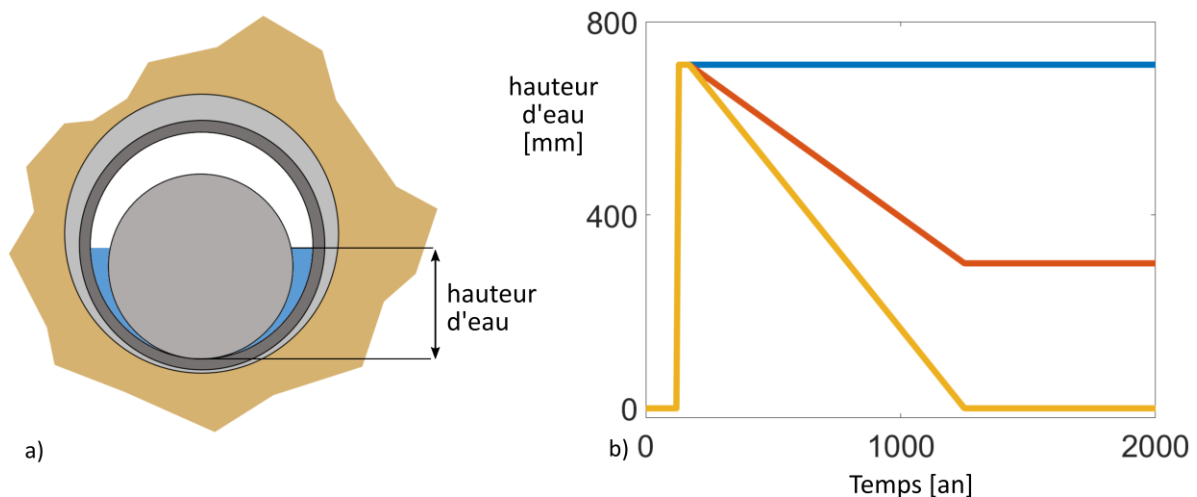


Figure 2.a. Représentation schématique de la hauteur d'eau b. Évolution de la hauteur d'eau suivant les trois scénarios envisagés

Comme introduit en section 2, deux taux de corrosion C_g et C_e sont définis respectivement en phase gazeuse et dans l'eau. L'évolution de chaque taux de corrosion est définie par trois paramètres : le taux de corrosion initial, à 120 ans et la valeur en régime établi ('est à die l'asymptote quand le temps tend vers l'infini). Chaque paramètre est considéré comme un événement ayant deux réalisations possibles : un scénario de corrosion rapide et un de corrosion lente. Une réalisation des trois paramètres définit un scénario d'évolution du taux de corrosion ; le cas d'un taux de corrosion élevé initialement puis faible à 120 ans et en régime permanent en est un exemple. Les taux de corrosion sont nécessairement décroissants du fait de l'appauvrissement en oxygène du milieu et à la croissance d'une couche de pseudo-passivation à la surface du conteneur [8,9]. S'il est faible pour un paramètre il est donc nécessairement faible pour le paramètre suivant. Il n'existe donc que quatre scénarios d'évolution pour C_g et quatre pour C_e (figure 3). De plus les valeurs définissant chaque scénario sont incertaines. Comme première approximation on considère que cet aléa ne dépend pas du

temps et que les taux de corrosion dans les deux milieux sont complètement corrélés. Cet aléa est donc défini par une unique variable aléatoire affectant les deux taux de corrosion et suivant une loi log-normale élicitée d'après un jugement d'expert [7].

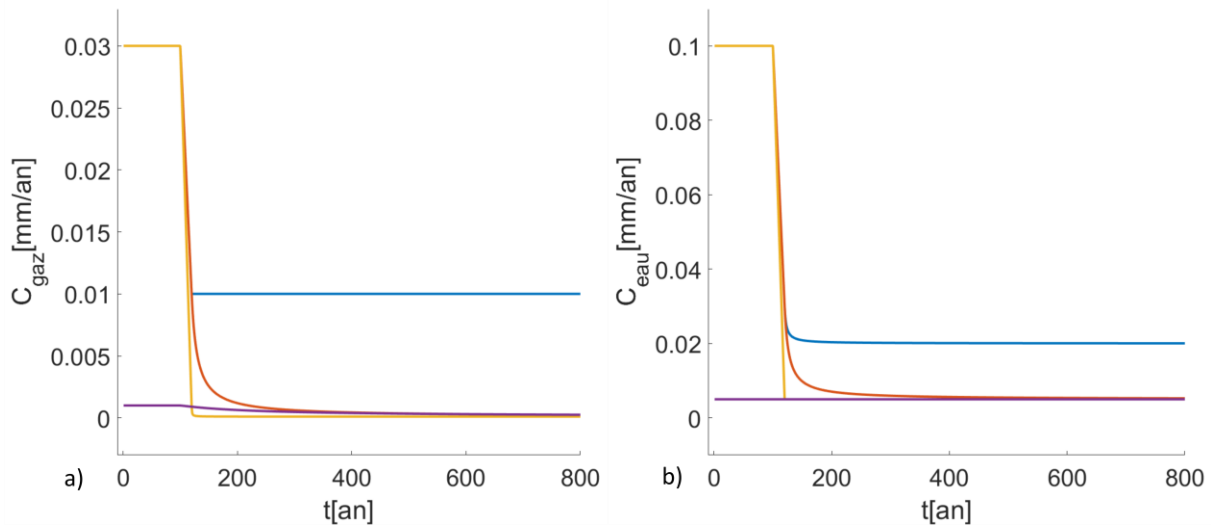


Figure 3. Évolution du taux de corrosion a) en atmosphère gazeuse b) dans l'eau suivant les quatre scénarios envisagés

La pression de contact transmise au conteneur après flambement du chemisage est également incertaine. Elle est définie par une variable aléatoire suivant une distribution log-normale élicitée d'après un jugement d'expert [7].

3.2 Modélisation de la géométrie

La corrosion est prise en compte comme une réduction de l'épaisseur du conteneur. La géométrie du conteneur est affectée par le processus de corrosion, elle est donc incertaine et dépendante du temps. Le taux de corrosion est dépendant du milieu, donc la corrosion n'est pas homogène autour du profil du conteneur. En effet les parties immergées sont corrodées plus rapidement que les parties en milieu gazeux. Afin de définir le profil corrodé du conteneur l'épaisseur corrodée est calculée en 16 points et une courbe spline est définie passant par ces points (figure 4).

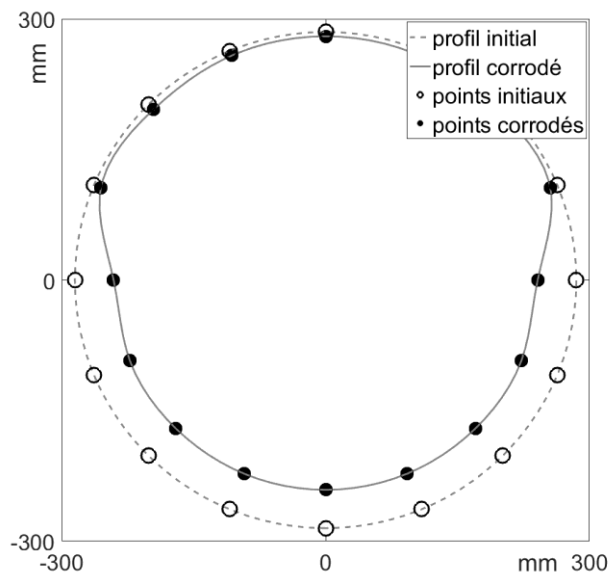


Figure 4. Représentation d'un profil corrodé du conteneur (correspondant à une hauteur stabilisée à mi-hauteur)

3.3 Modélisation du chargement

Le chargement est composé d'une pression fluide et d'une pression de contact. La pression de contact apparaît après flambement du chemisage qui résulte de l'action combinée de la corrosion et de la pression de la roche. La date de flambement est estimée à partir d'une loi empirique donnant la pression de flambement en fonction l'épaisseur du chemisage [10]. Cette loi considère le flambement d'un cylindre infini confiné soumis à une pression externe. Le flambement du chemisage est modélisé par deux surfaces de contact diamétralement opposées sur le profil du conteneur. Cela représente un flambement mono-lobe qui est le mode de ruine attendu en présence de confinement. L'orientation des lobes de flambement est considérée horizontale dans cette étude pour prendre en compte l'anisotropie de l'endommagement de la roche induite par l'excavation qui est plus étendue dans cette direction, ce qui induit une rigidité plus faible du milieu confinant horizontalement que verticalement [5]. Le comportement post-flambement et l'évolution du contact entre le chemisage et le conteneur sont très difficiles à prédire. Dans cette étude les surfaces de contact sont définies par un angle de contact (figure 5). Cet angle est considéré linéairement croissant de sorte qu'il atteint 180° en 3000 ans.

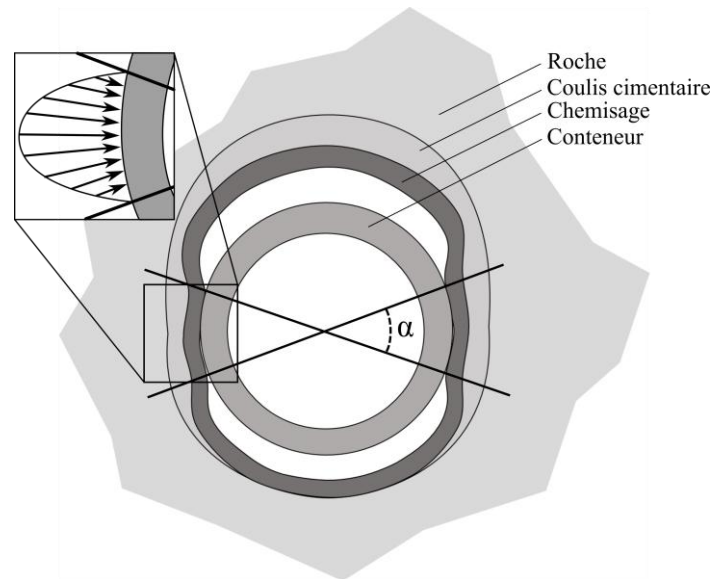


Figure 5. Représentation schématique de l'angle de contact et du profil de pression de contact

La pression transmise par le biais des surfaces de contact est définie suivant un profil parabolique de sorte que la pression soit nominale au centre et nulle aux extrémités du contact. L'évolution du profil est ainsi liée à l'évolution de l'angle de contact (figure 5). Les incertitudes liées à la pression de contact sont portées par la valeur nominale du profil de pression et affectent ainsi le profil en entier.

3.4 Discrétisation du processus continu

L'objectif de la discrétisation temporelle est de réduire le temps d'évaluation de la durée de vie du conteneur. La stratégie employée consiste à appliquer des cycles de chargement-déchargement et à transmettre les champs résiduels (contraintes, déformations, endommagement, ...) au pas de temps suivant. Le chargement mécanique et le processus de corrosion sont pris en compte séparément. Le modèle procède de la manière suivante : la géométrie initiale est soumise au cycle initial de chargement-déchargement, le maillage déformé plastiquement est récupéré, le processus de corrosion est appliqué au maillage déformé, les champs résiduels sont projetés sur le maillage déformé et corrodé, le cycle de chargement-déchargement correspondant au pas de temps suivant est appliqué, et ainsi de suite jusqu'à défaillance du conteneur.

Le processus de corrosion est appliqué au maillage déformé en considérant la réduction d'épaisseur comme une transformation géométrique du maillage. L'objectif est de tirer parti du fait que les maillages initiaux (non-déformés) pour chaque pas de temps sont facile à obtenir. La transformation géométrique est donc définie comme la différence de position des nœuds du maillage non-déformé entre deux pas de temps. De ce fait le processus de corrosion transforme le maillage déformé de la même manière qu'il aurait transformé le maillage non-déformé. Cette hypothèse reste valide tant que les déplacements induits par le chargement ou par la corrosion restent faibles devant les dimensions du modèle.

La projection des champs résiduels au maillage corrodé de l'itération suivant emprunte une méthode de projection utilisée pour la modélisation de pièces de forge reprises en usinage. Cette méthode permet de projeter les champs solutions d'un calcul éléments finis sur tout maillage inclus dans le maillage original. L'épaisseur du conteneur diminuant itérativement avec le temps cette méthode permet de rendre compte de l'effet de "gommage" des phénomènes de surface induit par le processus de corrosion.

3.5 Modélisation de l'endommagement

La défaillance du conteneur est considérée suivant un mode de rupture ductile. Le matériau est donc associé à une loi de comportement élastoplastique et une loi d'endommagement. Le modèle d'endommagement de Gurson [11] est choisi du fait de sa simplicité de mise en œuvre (il est intégré à la plupart des codes de calculs par éléments-finis). C'est un modèle dans lequel le comportement plastique et l'endommagement sont couplés (via un effet de l'endommagement sur le seuil de plasticité). Il est basé sur la croissance et la coalescence de porosités sphériques dans le matériau. La variable phénoménologique d'endommagement y est définie comme la fraction volumique de vide dans l'élément considéré, dont la valeur critique correspondant à la rupture ductile doit être identifiée.

La loi de comportement du matériau a été calée sur les résultats d'une campagne d'essais de traction sur éprouvettes prélevées dans une maquette de conteneur réalisée par l'Université de Technologie de Troyes suite à une collaboration autour de la modélisation du comportement mécanique du conteneur [12].

4 Propagation des incertitudes

La propagation des incertitudes est illustrée à travers l'évaluation du modèle sur 75 tirages de la pression de contact et du taux de corrosion. Les tirages ont été réalisés suivant le scénario le plus sévère de taux de corrosion et suivant le scénario de hauteur d'eau intermédiaire. On s'intéresse en sortie aux valeurs maximales dans le modèle de la fraction volumique de vide, de la contrainte de von-Mises, et de la déformation plastique équivalente (figure 6). Les histogrammes des valeurs de sortie sont tracés pour le pas de temps correspondant à 1900 ans de service.

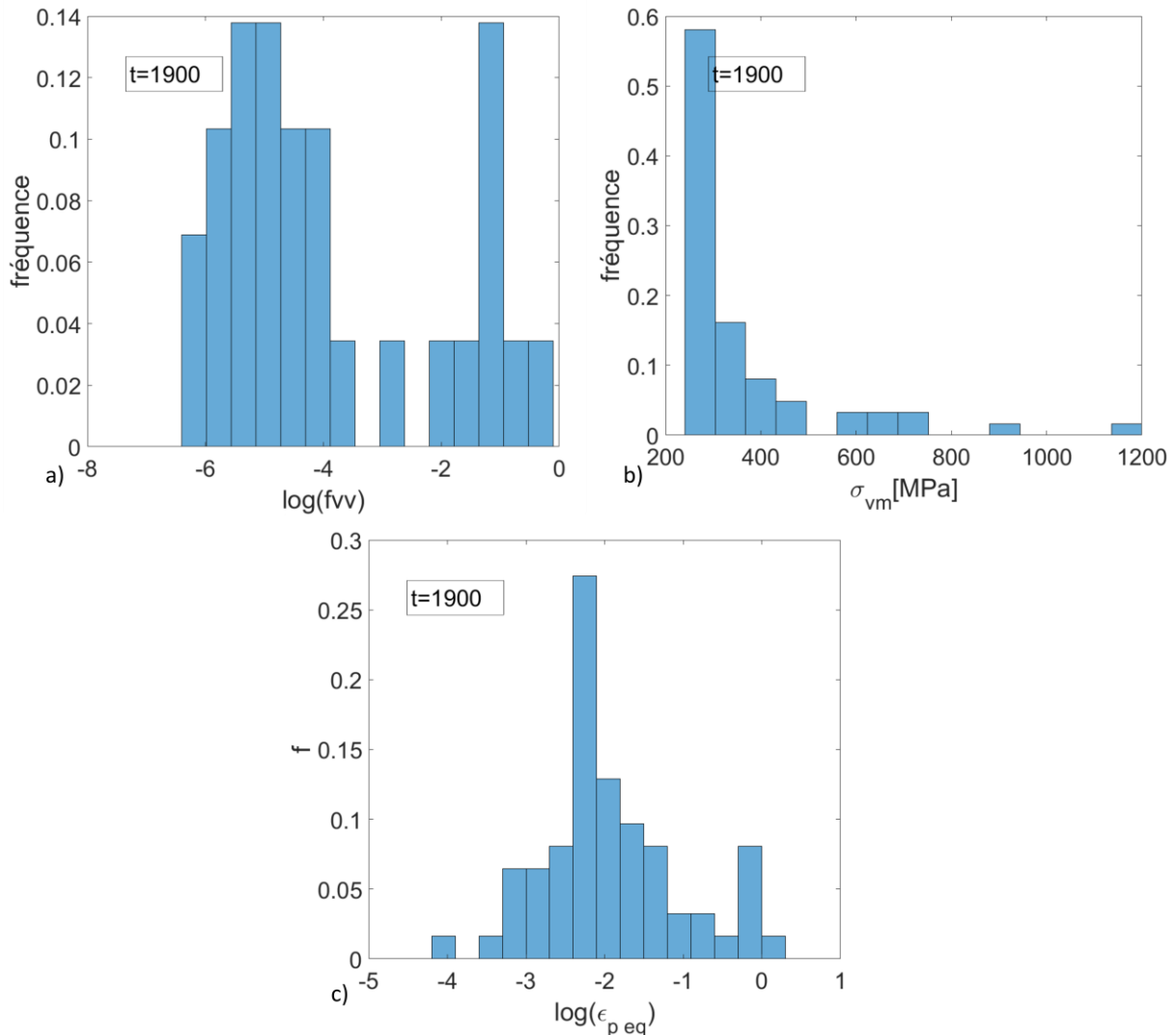


Figure 6. Histogramme des valeurs maximales à 1900 ans a. de la fraction volumique de vide en échelle logarithmique b. de la contrainte de von-Mises c. de déformation plastique équivalente en échelle logarithmique

5 Conclusions et perspectives

Un modèle éléments finis de conteneur de stockage de déchets radioactifs de haute activité permettant de reproduire l'évolution temporelle attendue et/ou sévérée des conditions de stockage et permettant les variations des paramètres incertains a été développé. Le comportement non-réversible induit par la plasticité est propagé dans le temps par une méthode de projection des champs résiduels. Le couplage mécano-fiabiliste est illustré par la propagation des incertitudes à travers le modèle.

Une seconde procédure d'élicitation des variables aléatoires est planifiée, elle permettra de prendre en compte les résultats expérimentaux récents (gamme de vitesses de corrosion attendues en lien avec les évolutions de concept : dispositions permettant de limiter le taux d'oxygène à 1% à l'intérieur de l'alvéole) et d'obtenir l'avis de plusieurs experts. La suite des travaux consiste à évaluer la réponse du système sur un plan d'expérience permettant le calage d'un métamodèle de krigeage. Le calage du métamodèle inclura un raffinement itératif du plan d'expérience. Le métamodèle permettra

de déployer les méthodes de fiabilité de manière plus efficace. La sensibilité de la réponse du modèle aux variations des paramètres d'entrée sera également étudiée. Enfin la résolution sera étendue à tous les scénarios envisagés pour obtenir une compréhension plus globale du problème.

Références

- [1] ANDRA. Dossier 2005 Synthesis Argile: Tome Phenomenological evolution of a geological repository. 2005.
- [2] Sudret B, Der Kiureghian A. Comparison of finite element reliability methods. *Probabilistic Engineering Mechanics* 2002;17:337–48. doi:10.1016/S0266-8920(02)00031-0.
- [3] Stefanou G. The stochastic finite element method: Past, present and future. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2009;198:1031–51. doi:10.1016/j.cma.2008.11.007.
- [4] Patelli E, Panayirci HM, Broggi M, Goller B, Beaurepaire P, Pradlwarter HJ, Schüeller GI. General purpose software for efficient uncertainty management of large finite element models. *Finite Elements in Analysis and Design* 2012;51:31–48. doi:10.1016/j.finel.2011.11.003.
- [5] Bumbieler F, Nécib S, Morel J, Cruset D, Armand G. Mechanical and SCC Behavior of an API5L Steel Casing Within the Context of Deep Geological Repositories for Radioactive Waste. *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference* 2015.
- [6] Hoorelbeke JM. Conteneurs pour le stockage des déchets HA et MAVL 2009:19.
- [7] Persoons A, Beaurepaire P, Chateaufort A, Bumbieler F. Effect of the manufacturing defects on the reliability of disposal packages for high level radioactive waste. *Proceedings of ESREL 2018*, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway n.d.:8.
- [8] Schlegel ML, Bataillon C, Brucker F, Blanc C, Prêt D, Foy E, et al. Corrosion of metal iron in contact with anoxic clay at 90 °C: Characterization of the corrosion products after two years of interaction. *Applied Geochemistry* 2014;51:1–14. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.09.002.
- [9] Nécib S, Bumbieler F, Duret-Thual C, Bulidon N, Crusset D, Combrade P. Assessment of the resistance to environmentally assisted cracking (EAC) of C-steel casing and overpack in the CO₂ claystone. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 2017;52:95–100. doi:10.1080/1478422X.2017.1336003.
- [10] Nguyen T. Flambage sous contact d'une coque cylindrique soumise à pression externe. INSA, 2017.
- [11] Gurson AL. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology* 1975. doi:10.1115/1.3443401.
- [12] Serveaux J, Labergère K, Saanouni K, Bumbieler F. Loading and generalized corrosion applied to a steel overpack until fracture, 2019.