

CARACTERISATION HYDROMECHANIQUE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT DE LA CRAIE DE CHATEAU-LANDON (77)

HYDROMECHANICAL CHARACTERIZATION AND MODELING OF THE BEHAVIOR THE CHATEAU-LANDON CHALK (77)

Danielle Rita PAJIEP^{1,2}, Nathalie CONIL¹, Jian-Fu SHAO², Mountaka SOULEY¹

¹ Institut national de l'environnement industriel et des risques – Ineris, France

² Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR9013, Lille, France

RÉSUMÉ – Cet article présente les résultats d'essais obtenus sur des échantillons saturés visant à une caractérisation du comportement hydromécanique de la craie de Château-Landon (77). Un modèle de comportement élastoplastique de ladite craie, inspiré de la micromécanique est en cours de développement. Les premières simulations associées aux résultats expérimentaux vont permettre d'enrichir sa formulation.

ABSTRACT – This paper presents the experimental results of tests carried out on saturated samples as a part of a wide laboratory characterization of the hydromechanical behavior of the Château-Landon chalk (77). An elastoplastic model of this chalk inspired by micromechanics is under development. The first simulations associated with the experimental results will allow to enrich its formulation.

1. Introduction

L'évaluation des risques liés à la présence d'ouvrages souterrains (carrières, mines, cavités naturelles) en cours d'exploitation et/ou abandonnés pose légitimement la question de la stabilité dans le temps de ces ouvrages. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement aux carrières souterraines de craie abandonnées qui sont soumises à des sollicitations hydromécaniques, notamment, des cycles d'humidification / séchage et/ou d'ennoyage souvent en liaison avec les saisons. Le comportement de la craie de Château-Landon a fait l'objet de plusieurs études (Lafrance 2016, Gombert et al., 2018, Souley et al., 2019). Toutefois très peu de données ont finalement pu être collectées en raison de sa sensibilité à l'eau, rendant ainsi les essais de laboratoire difficiles à réaliser en dépit de la mise en œuvre d'une méthodologie expérimentale particulière. Les principaux objectifs des travaux actuels visent donc à l'amélioration des connaissances du comportement hydromécanique de cette craie lorsqu'elle est soumise à des sollicitations mécaniques et hydriques monotones et/ou cycliques et le développement d'une approche de modélisation numérique pertinente pour l'analyse de la stabilité à long terme des cavités exposées à des conditions environnementales complexes. Ces nouveaux travaux doivent permettre de compléter la base de données expérimentales issues des études antérieures et de comprendre les mécanismes d'interaction eau-roche à l'origine du comportement rhéologique de cette craie.

2. Contexte du projet

En janvier 1910 est survenu l'effondrement de la carrière souterraine dite « Beaulieu », située dans la commune de Château Landon (77), après une suite de précipitations et la forte crue d'un cours d'eau, le Loing, situé en pied de carrière. Cet effondrement a généré

un glissement de terrain important emportant ainsi plusieurs habitations et causant la perte de 7 vies humaines.

La carrière de Château-Landon (propriété du département de la Seine-et-Marne), localisée sur la Figure 1 et voisine de la carrière Beaulieu, a été instrumentée par l'Ineris depuis 2020.

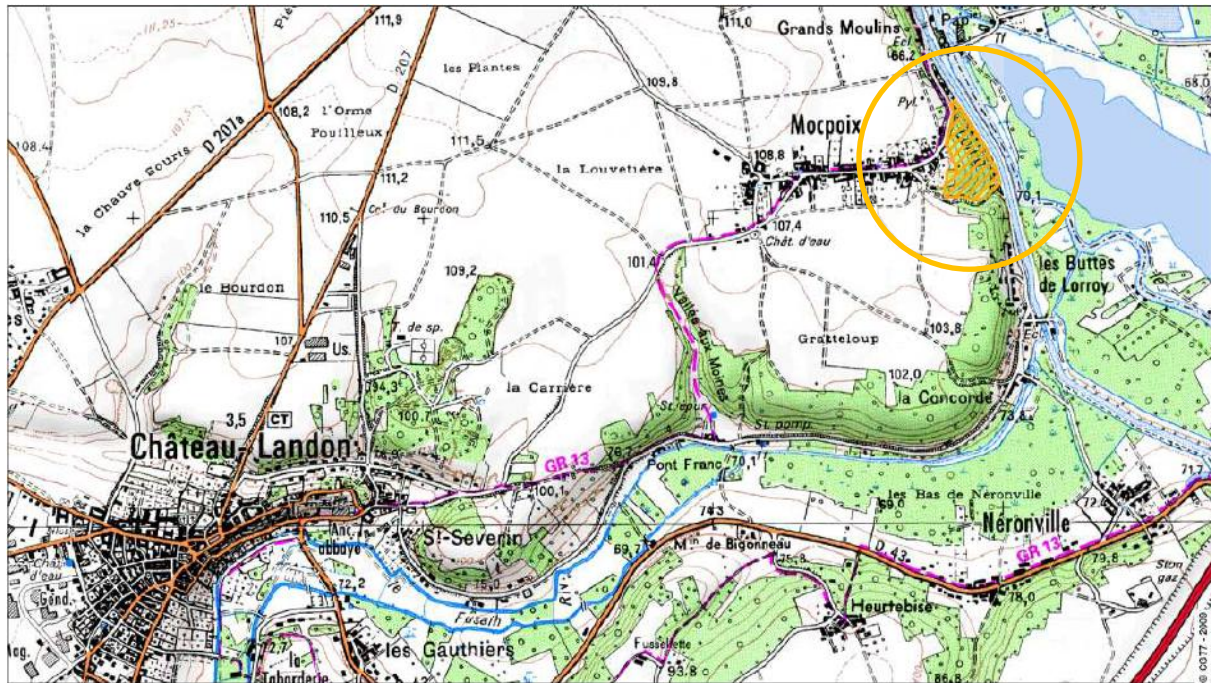


Figure 1 : Localisation de la carrière de Château-Landon – en jaune sur la figure

Elle a été retenue comme site pilote car elle présente de fortes similitudes géologiques et géomécaniques avec la carrière effondrée.

3. Schéma expérimental

Afin de compléter les données expérimentales existantes sur le comportement de la craie de Château-Landon (Lafrance, 2016, Munoz-Castelblanco et al., 2011), un programme expérimental destiné essentiellement à étudier l'influence du degré de saturation sur le comportement mécanique de la craie, a été constitué. Des essais à court et à long terme sont envisagés sous 4 degrés de saturation différents (allant d'un état sec correspondant à 59% à un état saturé du matériau). Il s'agit :

- D'essais de compression hydrostatique : afin d'identifier le seuil de pore-collapse en fonction de la saturation.
- D'essais de compression uniaxiale et triaxiale : les échantillons sont d'abord soumis à un état de contrainte hydrostatique donné maintenu constant jusqu'à la stabilisation des déformations et dont les valeurs varient entre 0 et 3 MPa pour différents degrés de saturation (Tableau 1). Les variations de déformations induites pendant ces cycles (mécaniques) sont mesurées pendant les essais.
- D'essais de fluage et de relaxation sous conditions hydriques imposées : pour les essais de fluage les paliers de contrainte sont déterminés à partir des résultats des essais à court terme. Par ailleurs, dans l'objectif de valider le modèle de comportement retenu, les essais de relaxations seront réalisés dans un état proche de la saturation et en condition saturée.

Tableau 1 : Programme expérimental

	Type d'essai	Pression de confinement (MPa)	Degré de saturation (%)			
			S1	S2	S3	S4*
Essais à court terme	Compression hydrostatique	-	59	85	97	100
	Compression uniaxiale	0	59	85	97	100
	Compression triaxiale	1	59	85	97	100
	Compression triaxiale	0,5 ; 1,5 ; 2 ; 3	-	-	-	100
Essais à long terme	Fluage	1	59	85	97	100
	Relaxation	1	-	-	97	100

*la saturation se fait avec de l'eau mis en équilibre avec la craie du site

4. Préparation des échantillons et dispositif expérimental

Les échantillons ont été prélevés sur site puis enrobés dans du film plastique et conservés dans des sacs hermétiquement fermés et dépourvus d'air. Une fois au laboratoire, ils sont carottés à l'eau puis taillés à la longueur désirée et rectifiés pour assurer la précision des formes géométriques. Pour les essais à court terme, les caractéristiques géométriques moyennes des éprouvettes sont : un diamètre de 36 mm et une hauteur de 72 mm.

Une cellule triaxiale de révolution a été utilisée pour réaliser les essais. Elle comprend trois parties principales : un chapeau auto-compensé, une enceinte de confinement et une embase. Le chapeau auto-compensé permet d'appliquer la contrainte déviatorique au moyen d'un système de pression par la descente du piston. Cette contrainte déviatorique est directement mesurée par un capteur de force. L'enceinte de confinement se compose de l'échantillon, du système LVDT (Linear Variable Differential Transformers) et d'un collier qui mesurent respectivement les déformations axiales et latérales. De l'huile a été utilisée comme fluide de confinement pour ne pas perturber le système de capteur LVDT, en raison de sa faible conductibilité électrique.

Avant les essais les échantillons sont resaturés, la saturation est réalisée de la manière suivante :

- concernant les 3 premiers degrés de saturation du Tableau 1 (S1 à S3), les échantillons sont placés dans des enceintes climatiques qui contrôlent l'humidité relative pendant 2 semaines environ jusqu'à une stabilisation de leurs masses. Différentes solutions sont disposées au fond des enceintes en fonction du degré de saturation visé. Suivant la dilution de ces solutions, il est possible d'obtenir différentes humidités relatives. L'avantage est que l'on peut avoir une variation continue de l'humidité relative, l'inconvénient est que l'hygrométrie est très sensible aux échanges gazeux quand on ouvre l'enceinte. Les produits utilisés pour les solutions sont les suivants :
 - Bromure de sodium NaBr (S1 = 59%)
 - Chlorure de potassium KCl (S2 = 85%)
 - Sulfate de potassium K₂SO₄ (S3 = 97%)

Les solutions sont composées d'environ 20-40 g de produit ajouté à 50 à 100 g d'eau. L'hygrométrie est mesurée à l'aide d'un hygromètre placé à l'intérieur de l'enceinte. Il faut noter également que les humidités relatives restent toutefois sensibles à la température, la pression et les échanges d'air : elles ont donc fluctué, mais sont restées globalement assez stables, la pièce où sont placées les enceintes ne montrant pas trop de variation de température. Les variations de

masse obtenues permettent de déduire la teneur en eau puis le degré de saturation de l'échantillon selon la formule :

$$Sr = \frac{w \cdot \gamma_d}{n \cdot \gamma_w} \text{ avec } \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w}$$

où w est la teneur en eau, γ_d est le poids volumique du matériau sec, γ_h celui du matériau "humide" (ou naturel) et γ_w celui de l'eau, enfin, n est la porosité.

- pour la saturation à 100% ($S_4 = 100\%$), elle est réalisée en injectant directement de l'eau dans l'échantillon. Une fois l'éprouvette mise en place dans la cellule et mise sous confinement, l'eau en équilibre chimique avec la craie, préparée au préalable, est injectée par l'une des faces de l'échantillon (par le bas) jusqu'à l'obtention d'un débit constant sur l'autre face (sortie de l'eau par le haut).

5. Résultats expérimentaux

Les essais triaxiaux drainés permettent d'étudier le comportement global de notre craie. Ces essais ont été réalisés en deux phases : la première consiste, après saturation, à soumettre l'échantillon à un champ de contraintes hydrostatiques maintenu constant jusqu'à la stabilisation des déformations (celles-ci étant enregistrées) et la deuxième phase consiste à imposer une contrainte déviatorique en augmentant uniquement la contrainte axiale par l'application d'une force axiale à l'aide d'une pompe à un débit constant. L'essai est alors mené jusqu'à grande déformation (aucune rupture n'a été observée pour l'instant). La mise en charge est suffisamment lente pour assurer le drainage simultané de l'échantillon. Les pressions de confinement utilisées jusqu'à présent sont 3, 2 et 1,5 MPa pour des échantillons entièrement saturés à l'eau.

L'ensemble des courbes contraintes-déformations obtenues sur la craie de Château-Landon est présenté sur la Figure 2.

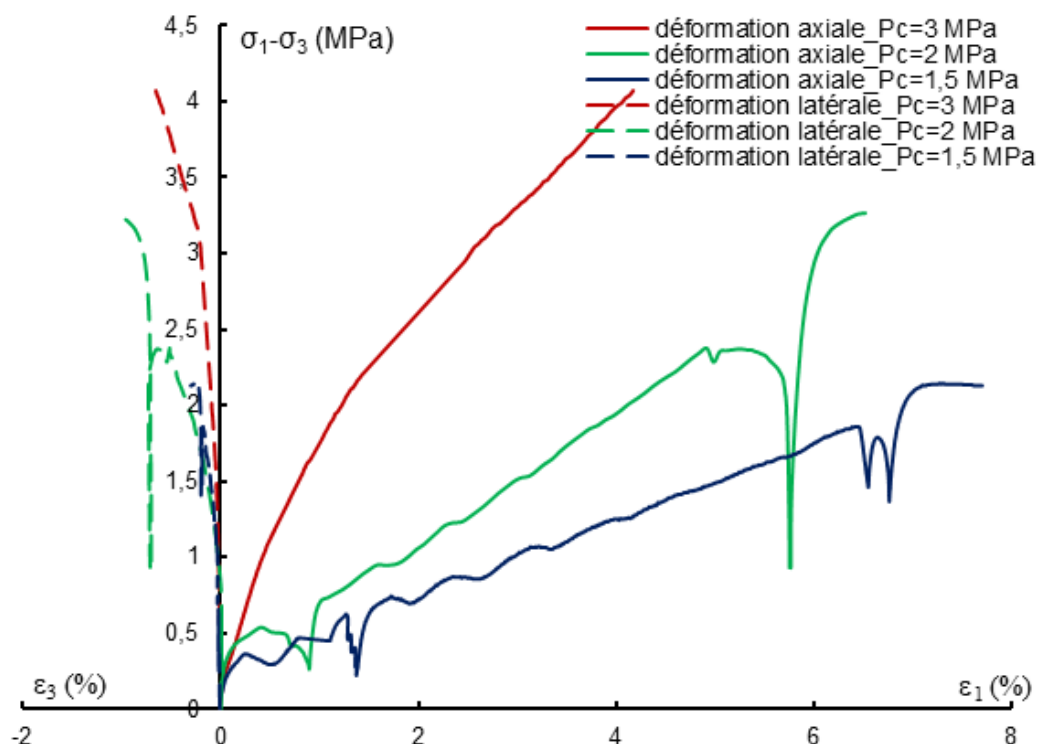


Figure 2 : Essais triaxiaux de compression sur échantillons saturés sous différentes pressions de confinement : 3, 2 et 1,5 MPa

Ces premiers résultats montrent que la craie de Château-Landon présente un comportement de type élastoplastique ductile en conditions saturées pour la gamme des

contraintes de confinement investiguées jusqu'ici (1,5 à 3 MPa). Aucune rupture n'est alors observée en dépit des déformations importantes enregistrées lors des essais. Toutefois les déformations axiales sont beaucoup plus importantes que les déformations latérales : ce qui se traduit par des déformations contractantes. La résistance de l'échantillon augmente avec la pression de confinement : ce qui est classique en mécanique des roches.

D'autres essais vont être réalisés pour compléter ces premiers résultats. Par ailleurs les essais de fluage actuellement en cours permettront également une description complète du comportement hydromécanique différé de cette roche, en plus du comportement instantané.

6. Le modèle de comportement de la craie de Château-Landon

Plusieurs modèles constitutifs ont été développés à partir des principaux mécanismes observés sur les craies les plus étudiées : qu'ils soient purement mécaniques ou couplés en conditions saturées et non saturées, avec ou sans prise en compte de la nature du fluide saturant, avec ou sans le comportement différé, avec ou sans dissolution des grains et endommagement chimique, etc. (Xie et Shao 2006 ; Alonso et al. 1990 ; Collin et al. 2002). Une attention particulière a été portée sur l'un des modèles micromécaniques développés par Shen et Shao (2018). Dans ce modèle, les auteurs considèrent la roche poreuse comme un matériau composite constitué d'une matrice solide et de pores sphériques. La matrice solide est décrite par un critère proposé par Shen et al. (2015) qui présente une meilleure description de la forte asymétrie entre les contraintes de compression et traction. Ce modèle utilise une surface de charge pour décrire la forte dépendance à la pression et le processus d'effondrement des pores et prend également en compte l'effet de la porosité en introduisant des paramètres qui varient en fonction de celle-ci. La fonction de charge macroscopique se présente alors comme suit :

$$\Phi(\Sigma, f, \alpha, \bar{\sigma}) = \frac{\frac{\Sigma_{eq}^2}{\bar{\sigma}^2}}{\left(\frac{1-f}{1-\Gamma}\right)^2 - 3\alpha \frac{(1-f)}{(1-\Gamma)^2} \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}}} + 2\Gamma \cosh\left(A \ln\left(1 - 3\alpha \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)\right) - 1 - \Gamma^2$$

Avec comme paramètres :

$$A = \text{sign}(\Sigma_m) \frac{8 + \alpha^2 W^2(fp) + 2\alpha^2 W(fp)}{18\alpha}$$

$$\Gamma = [\alpha^2 W^2(fp) + 2\alpha^2 W(fp)]^A$$

Où

- $\begin{cases} p_+ = z_+ \exp(z_+), & z_+ = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha}, \text{ Traction} \\ p_- = z_- \exp(z_-), & z_- = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha}, \text{ Compression} \end{cases}$
- W représente la fonction de Lambert définie par $W(x)e^{W(x)} = x$
- f la porosité
- Σ_m la contrainte moyenne du point de vue macroscopique
- α un paramètre qui contrôle la compressibilité plastique de la pression sur la matrice solide

Dans un premier temps, cette version de base du modèle de Shen et Shao (2018) a été programmée en langage Python. A titre de validation de cette implémentation numérique, un essai de compression triaxiale réalisé par les auteurs sur la craie de Lixhe

a été simulé. La Figure 3 montre les résultats de la simulation mis en regard des résultats expérimentaux. On remarque une très bonne concordance.

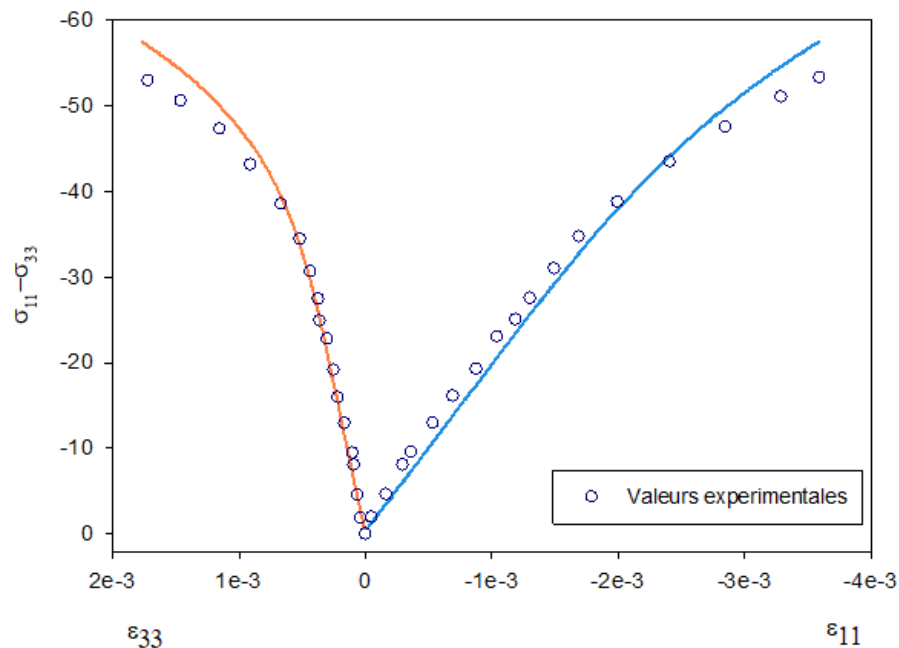


Figure 3 : Résultat de la simulation de l'essai de compression triaxiale sur la craie de Lixhe pour un confinement de 5 MPa en langage Python – Comparaison avec les données expérimentales (Shen et Shao, 2018)

Les études expérimentales menées sur La craie de Lixhe montrent que les caractéristiques mécaniques de la craie de Lixhe sont différentes de celles de la craie de Château Landon. Ainsi sous une pression de confinement de 2 MPa Xie (2005) met en évidence qu'elle présente plutôt un comportement de type élastoplastique fragile. La rupture de l'échantillon est observée pour de faible valeur de déformation. Par la suite ce modèle va être adapté aux caractéristiques de notre matériau et enrichi pour tenir compte des principaux mécanismes mis en évidence dans cette campagne d'essais en cours et à venir (Tableau 1) à savoir :

- La dépendance de la craie à la saturation à l'eau S_w
- L'influence de la porosité de la craie : la craie étant un milieu poreux, son comportement macroscopique est fortement influencé par sa microstructure et son évolution
- La transition d'un comportement fragile à ductile avec l'augmentation du confinement : introduction d'un mécanisme d'endommagement et quantification après réalisation des essais à faible confinement ($\sigma_3 \rightarrow 0$)
- Le comportement différé de la craie à travers la fonction de charge dans laquelle l'influence de la viscoplasticité et de l'hygrométrie sur la viscosité du matériau seront également prises en compte.

7. Conclusions

Les premiers résultats de l'étude expérimentale du comportement hydromécanique de la craie de Château-Landon ont été présentés. Ils ont montré que cette craie présente un comportement de type élastoplastique ductile en conditions saturées pour la gamme des contraintes de confinement investiguées (1,5 à 3 MPa). Des essais de fluage sont en cours ils permettront de caractériser le comportement à long terme de cette craie. Un modèle micromécanique prenant en compte les principales caractéristiques de ce

matériau est en cours de développement. Il s'appuie sur le modèle proposé par Shen et Shao (2018). Ce dernier a été programmé en langage Python et validé sur un essai de compression triaxiale réalisé sur la craie de Lixhe. Le modèle final sera implémenté dans un code de calcul et validé sur des chemins de contraintes d'essais classiques de mécanique des roches. Des modélisations de quelques cas simplifiés mais représentatifs de la carrière seront ensuite réalisées.

8. Références bibliographiques

Alonso E. E., Gens A., Josa A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3): 405-430.

Collin F., Cui Y. J., Schroeder C., Charlier R. (2002). Mechanical behaviour of Lixhe chalk partly saturated by oil and water: experiment and modelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 26: 897-924.

Gombert P., Auvray C., Al Heib M. (2013). In-situ and laboratory tests to evaluate the impact of water table fluctuations on stability of underground chalk mines. *Procedia Earth Planet. Sci.* 7, 304–308.

Lafrance N. (2016). Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

Munoz-Castelblanco J., Pereira J.M., Minh Tang A., Delage P. (2011). Comportement de la craie du site de Lorroy. Rapport de recherche. Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier/CERMES, 15/12/2010, 15 p.

Shen W. Q., Shao J. F. (2018). A micro-mechanics-based elastic–plastic model for porous rocks : Applications to sandstone and chalk. *Acta Geotechnica*, 13, 329-340.

Shen W. Q., Shao J. F., Kondo D., De Saxcé G. (2015). A new macroscopic criterion of porous materials with a Mises-Schleicher compressible matrix. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 49, 531-538.

Souley M., Lafrance N., Auvray C., Labiouse V., Belem T. (2016). An elastoplastic and viscoplastic model for porous geomaterials. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, 481- 486.

Xie S.Y. (2005). Contribution à l'étude du comportement mécanique du roche poreuse, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, France

Xie S.Y., Shao J.F. (2006). Elastoplastic Deformation of a Porous Rock and Water Interaction. *International Journal of Plasticity* 22 (12), 2195- 2225.