



HAL
open science

Essais complexes pour la caractérisation des matériaux : Comment décrire la multiaxialité ?

Léna Costecalde, Adrien Leygue, Michel Coret, Erwan Verron

► To cite this version:

Léna Costecalde, Adrien Leygue, Michel Coret, Erwan Verron. Essais complexes pour la caractérisation des matériaux : Comment décrire la multiaxialité ?. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281718

HAL Id: hal-04281718

<https://hal.science/hal-04281718>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Essais complexes pour la caractérisation des matériaux : comment décrire la multiaxialité ?

L. COSTECALDE^a, M. CORET^a, A. LEYGUE^a, E VERRON^a

a. Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France, {lena.costecalde, michel.coret, adrien.leygue, erwan.verron}@ec-nantes.fr

Résumé :

La caractérisation du comportement mécanique des matériaux est un défi classiquement associé aux essais simples et à leur répétition. En parallèle, de nombreux travaux proposent des méthodes d'identification basées sur des essais complexes, comme la FEMU ou la VFM. Dans cet article est posée la question de la complexité des essais multiaxiaux, et de la manière de représenter et quantifier cette multiaxialité. Les invariants K_1 , K_2 , K_3 du tenseur des déformations logarithmiques \mathbf{H} (tenseur de Hencky) sont utilisés pour caractériser les états de déformation subis par une éprouvette trouée soumise à un chargement multiaxial. Lors d'une simulation éléments finis, la répartition des éléments dans le plan (K_2, K_3) permet d'apprécier la diversité des chargements mis en jeu lors de l'expérience. L'essai est ensuite réalisé sur une membrane de caoutchouc SBR montée sur une machine à six actionneurs. Une méthode de corrélation d'images permet d'obtenir les champs de déplacement qui serviront à bâtir la carte de répartition des éléments dans le plan (K_2, K_3) .

Abstract:

The major challenge of identifying material response has been historically related to simple deformation state experiments and their repetition. Other identification methods based on complex experiments, such as FEMU or VFM methods have also been proposed. This article addresses the issue of quantifying the diversity of such complex experiments. Three invariants K_1 , K_2 , K_3 of Hencky's logarithmic deformation tensor \mathbf{H} are used to characterize deformation states endured by a perforated membrane subjected to a multiaxial load. The distribution of elements on the (K_2, K_3) plan during a finite Elements simulation gives clues about the loading diversity at stake during such an experiment. A perforated SBR membrane is then submitted to a multiaxial experiment using a multi-actuators machine. Digital image correlation method is used to obtain displacement fields, which will allow the construction of the distribution of elements on the (K_2, K_3) plan.

Mots clés : Caractérisation, multiaxialité, essai non-homogène.

1 Introduction

La caractérisation des matériaux constitue encore aujourd'hui un challenge pour les mécaniciens des matériaux. Historiquement, pour les matériaux très déformables comme les élastomères, la combinaison de trois essais simples (traction uniaxiale, cisaillement pur et traction équibiaxiale) et leur répétition sous divers niveaux de chargement permet la caractérisation du comportement mécanique [1], comme illustré sur la Figure 1. Après réalisation des trois types d'essais dits simples, permettant un calcul explicite des champs de contraintes, une loi de comportement est choisie et ses paramètres calculés afin de minimiser la distance entre la loi de comportement et les nuages de points issus des essais expérimentaux. Ce processus incluant les essais, leur dépouillement (au sens du calcul des champs de contrainte), le choix de la loi de comportement et l'adaptation de ses paramètres est appelé « identification du comportement mécanique du matériau ».

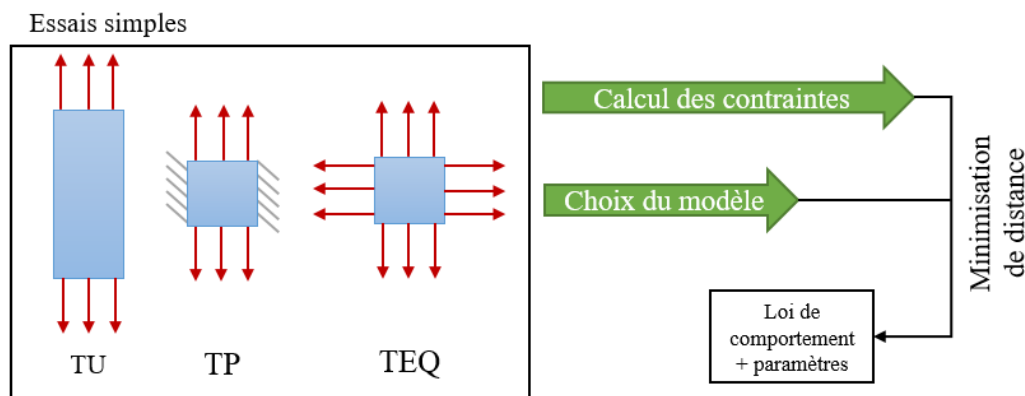


Figure 1- Méthode d'identification basée sur les essais à états de déformation simples.

D'autres méthodes mettant en jeu des essais complexes ont plus récemment été proposées, par exemple la FEMU [2] et la VFM [3]. La FEMU (Finite Elements Model Updating) est une méthode d'identification itérative basée sur des modèles éléments finis. Contrairement à la méthode classique, la FEMU repose sur une expérience unique, qui peut être multiaxiale. Le choix de la loi de comportement et des paramètres initiaux de celle-ci sont faits a priori. À chaque itération, un calcul éléments finis tenant compte de la géométrie, du chargement et du modèle (loi de comportement, paramètres) est effectué. Ses résultats en déplacements sont alors comparés aux champs de déplacement mesurés lors de l'expérience. Si la concordance est jugée trop faible, les paramètres de la loi de comportement sont modifiés, et une nouvelle simulation est effectuée. L'algorithme poursuit ainsi jusqu'à ce que la concordance soit jugée acceptable. Cette méthode basée sur un unique essai complexe amoindrit les coûts expérimentaux et les besoins en matériau, mais les remplace par un coût en temps de calcul.

Dans cet article, on se propose d'apprécier la diversité des chargements en jeu dans de tels essais multiaxiaux. Dans un premier temps, les outils numériques seront présentés, ainsi que les moyens d'essais à disposition pour construire de tels essais. Dans un second temps, ces outils seront appliqués sur des données de simulation numérique, puis des données réelles. Enfin, les limites de ces méthodes et les perspectives envisagées seront présentées.

2 Matériel et méthodes

2.1 Description théorique des états de déformation

En mécanique des milieux continus, il existe plusieurs mesures de la déformation, représentées à l'aide de tenseurs d'ordre 2. Criscione *et al.* [4] utilisent les invariants K_1 , K_2 , K_3 du tenseur des déformations logarithmiques \mathbf{H} (tenseur de Hencky) pour caractériser les états de déformation. Le tenseur des déformations logarithmiques est issu de la décomposition polaire du gradient de transformation \mathbf{F} comme exprimé dans l'équation (2.1). Le logarithme tensoriel est ensuite appliqué pour obtenir \mathbf{H} comme exprimé dans l'équation (2.2).

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U} = \mathbf{V}\mathbf{R} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{H} = \ln \mathbf{V} \quad (2.2)$$

Les invariants du tenseur de Hencky sont des scalaires indépendants de la base d'expression du tenseur. Les trois invariants choisis par Criscione sont calculés comme suit :

$$K_1 = \text{tr}\mathbf{H}, \quad (2.3)$$

$$K_2 = \sqrt{\text{dev}(\mathbf{H}) : \text{dev}(\mathbf{H})} \quad (2.4)$$

avec

$$\text{dev}(\mathbf{H}) = \mathbf{H} - \frac{\text{tr}(\mathbf{H})}{3} \mathbf{I}_3 \quad (2.5)$$

avec \mathbf{I}_3 le tenseur identité, et

$$K_3 = 3\sqrt{6} \det\left(\frac{\text{dev}(\mathbf{H})}{K_2}\right). \quad (2.6)$$

Chacun de ces trois invariants exprime une information sur la déformation subie par l'élément considéré. K_1 est un nombre réel qui reflète l'amplitude et le signe de la dilatation du volume de matériau. Il est donc nul dans le cas des matériaux incompressibles. K_2 est un nombre réel positif qui exprime l'amplitude de la distorsion subie, c'est-à-dire qu'il augmente avec le niveau de déformation subie. Quant à K_3 , qui appartient à l'intervalle $[-1, 1]$, il révèle le mode de déformation. Trois valeurs particulières sont à retenir :

- $K_3 = 1$ correspond à la traction uniaxiale,
- $K_3 = 0$ correspond au cisaillement pur,
- $K_3 = -1$ correspond à la compression uniaxiale.

Les autres valeurs de K_3 correspondent à des états de déformation plus complexes. Dans la suite de cet article, on considère un matériau incompressible ($K_1 = 0$), et seuls deux des trois invariants seront observés : K_2 et K_3 .



Figure 2- Banc expérimental composé d'un hexapode BREVA Symétrie, de traverses fixes et de mors adaptés à la géométrie des membranes. Une caméra enregistre l'éprouvette en cours de sollicitation.

dont une traction simple, un chargement en cisaillement et des rotations de la frontière basse de l'éprouvette. Un capteur six axes placé dans la platine de l'hexapode assure la collecte des données de forces résultantes et moments résultants au cours de l'expérience. Une caméra placée face à l'éprouvette capture des images à intervalles réguliers. Ces images serviront à alimenter le logiciel de corrélation d'images Ufreckles [5], pour permettre la mesure des champs de déplacement au cours de l'expérience. Le logiciel utilise une analyse séquentielle avec prédictions explicites pour effectuer la corrélation.

2.2 Matériel et instrumentation

Un banc expérimental a été développé pour permettre la réalisation d'essais complexes sur des membranes élastomères. Après y avoir déposé un mouchetis, une membrane de caoutchouc SBR chargé au noir de carbone percée de six trous est montée sur le banc d'essai composé d'un hexapode et de traverses fixes, comme montré sur la Figure 2.

L'éprouvette considérée est une membrane rectangulaire de 65 mm de haut et 100 mm de long, percée de six trous de 6 à 22 mm de diamètre. L'hexapode est un moyen d'essai à six actionneurs, piloté en déplacement selon les trois translations et trois rotations de l'espace. Un essai en six étapes de chargement, dans le plan (y,z) a été programmé afin de bâtir un essai complexe. L'essai est décrit par les courbes de position et d'orientation de la plateforme de l'hexapode sur la Figure 3, avec les translations selon l'axe vertical z en vert, la translation dans le plan de l'éprouvette (axe y) en rouge et enfin la rotation selon la normale à la membrane en bleu. L'essai est composé de diverses étapes

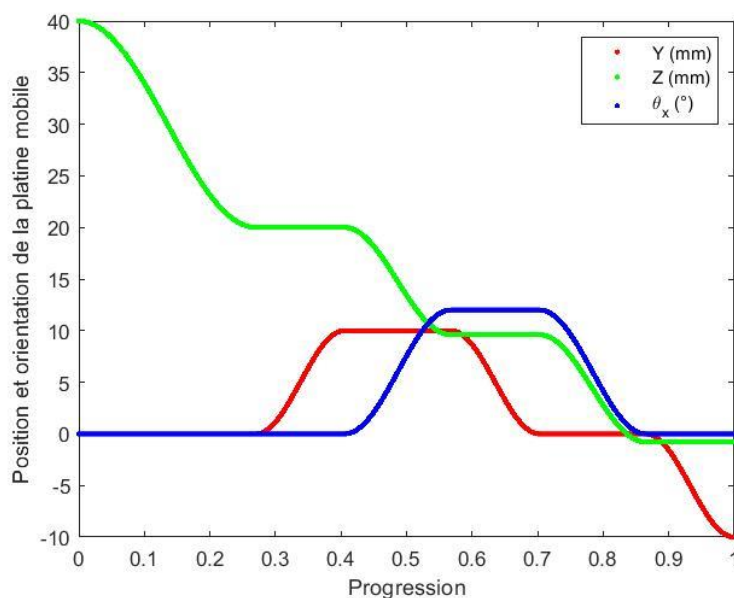


Figure 3 - Position et orientation absolues de la plateforme mobile au cours de l'expérience.

imposé sont résumées dans le Tableau 1. Comme pour le montage expérimental, le bord supérieur de la

2.3 Simulation éléments finis

En parallèle, une simulation éléments finis est effectuée sur la même géométrie d'éprouvette, avec un modèle de comportement élastique linéaire incompressible, sur le logiciel Abaqus CAE. La simulation est effectuée en deux dimensions, sous hypothèse des contraintes planes. Le maillage considéré est constitué de 1145 nœuds formant 2114 éléments triangulaires linéaires. Les six étapes de chargement en déplacement

membrane est considéré comme fixe et les déplacements et rotations sont imposés sur le bord inférieur. Un point de référence situé au centre du bord inférieur est défini pour imposer les conditions aux limites. Cette simulation sert à éprouver les outils de caractérisation des essais complexes et à comparer les champs de déplacements avec ceux obtenus lors de l'expérimentation. Six pas de temps correspondant à la fin de chaque étape de chargement seront considérés, pour alléger la quantité de données.

| Etape | u_y (mm) | u_z (mm) | R_x (°) |
|-----------------|------------|------------|-----------|
| Initiale | 0 | 0 | 0 |
| Etape 1 | 0 | -20 | 0 |
| Etape 2 | 10 | -20 | 0 |
| Etape 3 | 10 | -20 | 12 |
| Etape 4 | 0 | -30.40 | 12 |
| Etape 5 | 0 | -40.79 | 0 |
| Etape 6 | -10 | -40.79 | 0 |

Tableau 1 - Déplacements et rotation imposés au point de référence au cours de la simulation. Le point de référence est situé au centre du bord inférieur de la membrane.

2.4 Données de référence

Un jeu de données de référence a été choisi dans le but de comparer les niveaux et modes de déformation atteints lors de nos essais complexes à une campagne de caractérisation basée sur des essais simples. Les données de Treloar [1] comportent trois types de sollicitations : traction uniaxiale, traction équi-biaxiale et cisaillement pur, appliquées à du caoutchouc vulcanisé. Les valeurs des invariants du tenseur de Hencky ont été calculées pour ces données et seront comparés aux essais complexes menés à bien.

3 Résultats

3.1 Sur des données numériques

Les résultats de la répartition des éléments dans le plan (K_2 , K_3) pour les six étapes de chargement de la simulation numérique sont présentés sur la Figure 4. Sur cette carte des niveaux et modes de déformation sont placées des droites pointillées représentant le domaine des essais simples. Ces trois droites correspondent aux valeurs particulières de K_3 mises en avant précédemment. Sur ces droites sont placées les données de référence de Treloar, sous forme de croix noires.

La répartition des éléments du maillage est représentée par la légende de couleur. Elle doit être lue comme un histogramme à deux entrées, dont la hauteur des barres (nombre d'éléments par catégorie, ici normalisé par le logarithme de la probabilité d'apparition) est représentée par la gradation de couleur. La carte indique que malgré une sollicitation multiaxiale sur une éprouvette trouée, de nombreux éléments se trouvent proches d'un état de traction uniaxiale (vers le haut du domaine). Les niveaux de déformation atteints en traction uniaxiale correspondent bien à la réalité de l'expérience. Les niveaux de déformation atteints par Treloar lors de sa campagne expérimentale ne sont pas atteints lors de cet essai.

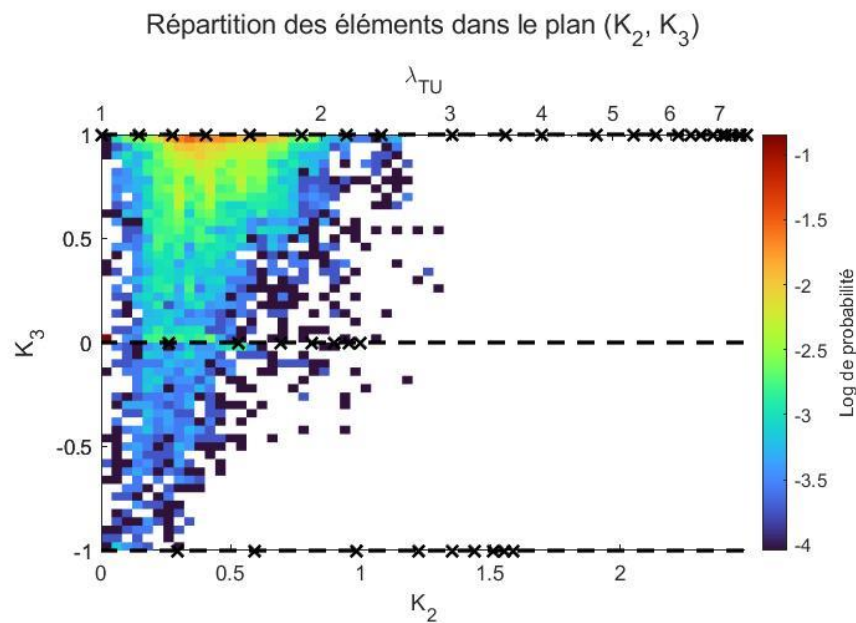


Figure 4- Répartition des éléments dans le plan (K_2 , K_3) lors des six étapes de simulation numérique. La densité de points par zone du plan est représentée par colorimétrie. Les lignes pointillées décrivent les domaines des essais simples et les croix noires représentent les états de déformation associés aux essais de Treloar [1].

3.2 Sur des données réelles

Une expérience a été réalisée sur le banc d'essai, et 500 images ont été prises, à une fréquence de 1 Hz. Les images ont été traitées par Ufreckles pour obtenir les champs de déplacement et calculer les déformations logarithmiques puis les invariants du tenseur de Hencky pour chaque élément à chaque pas de temps. La carte de répartition des éléments dans le plan (K_2 , K_3) est présentée sur la Figure 5. Les niveaux de déformation atteints sont du même ordre de grandeur que ceux de la simulation : ils n'atteignent pas non plus les niveaux de déformation atteints par Treloar lors de sa campagne expérimentale. Cependant les résultats diffèrent de ceux de la simulation, car ici 500 pas de temps sont considérés et non 6 comme précédemment.

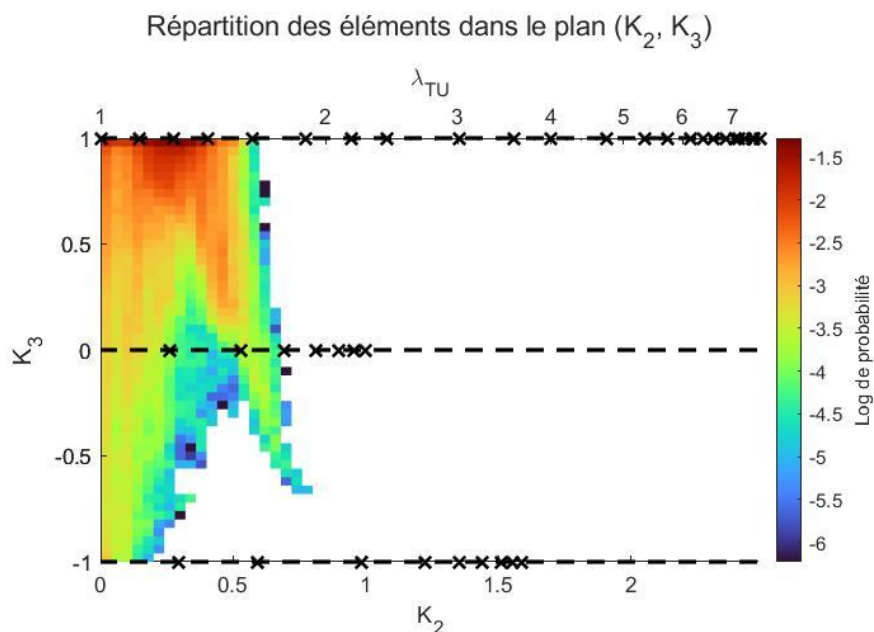


Figure 5 - Répartition des éléments dans le plan (K_2 , K_3) lors des 500 étapes de l'essai. La densité de points par zone du plan est représentée par colorimétrie. Les lignes pointillées décrivent les domaines des essais simples et les croix noires représentent les états de déformation associés aux essais de Treloar [1].

La carte de déformation construite sur la simulation éléments finis représente 2114 éléments sur six étapes de chargement, soit 12 684 points, tandis que la carte de déformation construite sur les données

expérimentales comporte 3370 éléments représentés durant 499 étapes de chargement, soit plus de 1.6 millions de points. Les données de simulation représentées correspondent aux déformations extrêmes de chaque étape de chargement, sans considérer d'état intermédiaire entre chaque étape de chargement. La normalisation des données représentées permet la comparaison des deux cartes. Cependant, le plus grand nombre de pas de temps considéré sur la carte expérimentale permet de visualiser davantage d'états de déformation qui se situent sur un chemin de chargement. Par ailleurs, lors de l'utilisation de la méthode de corrélation d'images, il est nécessaire de conserver une légère marge entre les bords de l'éprouvette et la zone d'intérêt. On perd alors l'information au niveau des zones les plus sollicitées en traction selon la simulation. On observe également un léger glissement dans les mors au cours de l'essai, ce qui entraîne la modification du mode de déformation le long des frontières latérales de l'éprouvette. Il est donc cohérent de ne pas retrouver les mêmes niveaux de déformation maximaux.

4 Conclusion

Dans cette approche par carte de mode et niveaux de déformation, la volonté est de représenter la diversité des modes de déformation atteignables grâce à une géométrie complexe et un essai mettant en œuvre plusieurs actionneurs. Le choix est fait ici de ne pas réduire les résultats de la carte à une métrique sous forme d'un scalaire, qui réduirait la richesse des résultats observés à une valeur unique. Dans l'exemple proposé, les niveaux de déformation atteints ne sont pas suffisants pour reproduire des données historiques d'identification. Cependant, la qualité de l'identification pourrait bénéficier de la richesse des modes de déformation proposés dans cet essai. Il est également à noter que les niveaux de déformation atteignables sont contraints d'une part par les limites physiques de la machine sur laquelle les essais sont mis en œuvre. Néanmoins, il semble que l'appréciation de la diversité des modes de déformation se révèle une information précieuse pour qualifier un essai de multiaxial.

Les perspectives de ces travaux consisteront à appliquer cette méthode de caractérisation à des essais multiaxiaux utilisés en entrée de méthodes d'identification novatrices : les identifications Data-driven. Les méthodes data-driven développées d'après les travaux de Kirchdoerfer et Ortiz [6] puis de Leygue et al. [7] permettent de représenter un matériau par un nuage de points expérimentaux plutôt que par une loi de comportement. Ces méthodes sont adaptées à l'identification sur essais complexes, et permettent le calcul d'un champ de contraintes mécaniquement admissible sans utiliser de loi de comportement.

Références

- [1] Treloar, L. R. G. (1944) Stress-Strain Data for Vulcanised Rubber under Various Types of Deformation. *Transactions of the Faraday Society* 40, 59-70.
- [2] Ienny, P., Caro-Bretelle A-S., Pagnacco, E. (2009) Identification from Measurements of Mechanical Fields by Finite Element Model Updating Strategies: A Review. *European Journal of Computational Mechanics* 18, (3-4), 353-76.
- [3] Toussaint, E., Grédiac, M., & Pierron, F. (2006). The virtual fields method with piecewise virtual fields. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(3), 256-264.
- [4] Criscione, J. C., Humphrey, J. D., Douglas, A. S., & Hunter, W. C. (2000). An invariant basis for natural strain which yields orthogonal stress response terms in isotropic hyperelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(12), 2445-2465.
- [5] Réthoré, J. "Ufreckles." URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.1433776> (2018).
- [6] Kirchdoerfer, T., & Ortiz, M. (2016). Data-driven computational mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 304, 81-101.
- [7] Leygue, A., Coret, M., Réthoré, J., Stainier, L., & Verron, E. (2018). Data-based derivation of material response. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 331, 184-196.