

# REFORCEMENT DES DIGUES PAR LA TECHNIQUE DU DEEP SOIL MIXING : RETOUR D'EXPERIENCES SUR LA LEVEE DE TOURS LOIRE AMONT.

## REINFORCEMENT OF LEVEES BY DEEP SOIL MIXING TECHNIQUE - CASE HISTORY OF TOURS LOIRE AREA

Lucile SAUSSAYE<sup>1</sup>, Alain LE KOUBY<sup>2</sup>, Fabrice MATHIEU<sup>3</sup>, Jean François MOSSER<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Cerema Normandie-Centre, Blois, France

<sup>2</sup> IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

<sup>3</sup> Soletanche Bachy, Paris, France

**RÉSUMÉ** La technique de renforcement de corps de digue par deep soil mixing est utilisée depuis 2014 pour un tronçon de 10 km sur la levée de Tours Loire Amont soumis à une problématique d'érosion interne. L'objectif de cet article est de faire une synthèse des paramètres mesurés *in situ*, susceptibles d'influencer les paramètres mécaniques et hydrauliques du mélange sol-ciment mis en œuvre, afin d'émettre des recommandations pour optimiser la formulation des mélanges lors de futurs travaux.

**ABSTRACT** Deep soil mixing method has been used to reinforce levees since 2014 on a 10 km long structure on Tours Loire area. The aim of these works was to mitigate the risk of internal erosion. This paper attempts to find relationships between *in situ* measured parameters which may influence hydraulic and mechanical properties of the soil cement material. The final goal is to suggest recommendations to optimize soil mixing formulation for future construction works.

### 1. Contexte

L'étude de dangers des levées du Val de Tours, finalisée en 2013, propose en priorité de renforcer contre l'érosion interne cette levée de Loire sur 10,450 km, compris entre Montlouis-sur-Loire, à l'amont, et le pont Mirabeau de Tours, à laval. Le maître d'œuvre de ces travaux est la Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire (DDT 37), le maître d'œuvre est la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Centre-Val de Loire. C'est dans le cadre de ce renforcement qu'a été choisie la méthode de traitement par tranchée de sol mixé (procédé Trenchmix®). Cette technique consiste à mélanger le sol *in situ* avec un liant hydraulique pour améliorer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques du mélange.

Ce papier présente un retour d'expérience sur les chantiers de 2015 et 2016, sur les communes de La Ville-aux-Dames (LVAD) et de Montlouis-sur-Loire (MLSL). Il se base sur l'analyse des paramètres mesurés *in situ* (contrôle du taux d'incorporation du ciment, enregistrement des paramètres de malaxage de la machine, mesure de densité du mélange en place) et leur influence sur les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression simple  $R_c$ ) et hydrauliques (perméabilité  $k$ ) du mélange sol-ciment à l'état durci, mesurées en laboratoire.

## 2. Méthode de deep soil mixing appliquée au renforcement de corps de digue

### 2.1. Nature des sols en place

Dans le cas d'un renforcement de digue, il est nécessaire de déterminer les profils en long géotechniques permettant de définir la profondeur de l'écran à réaliser. Il convient de localiser les profils de prélèvement afin de connaître les couches de sols traversées lors du malaxage et leurs caractéristiques physiques. En effet, le principe de la tranchée de sol mixé est tel que toutes les couches vont être mélangées avec l'eau et le ciment. Les profils de prélèvements sont référencés selon les profils métriques (PM) définis par l'entreprise pour l'implantation des travaux et sont reportés sur le plan de récolement de l'ouvrage (Figure 1).

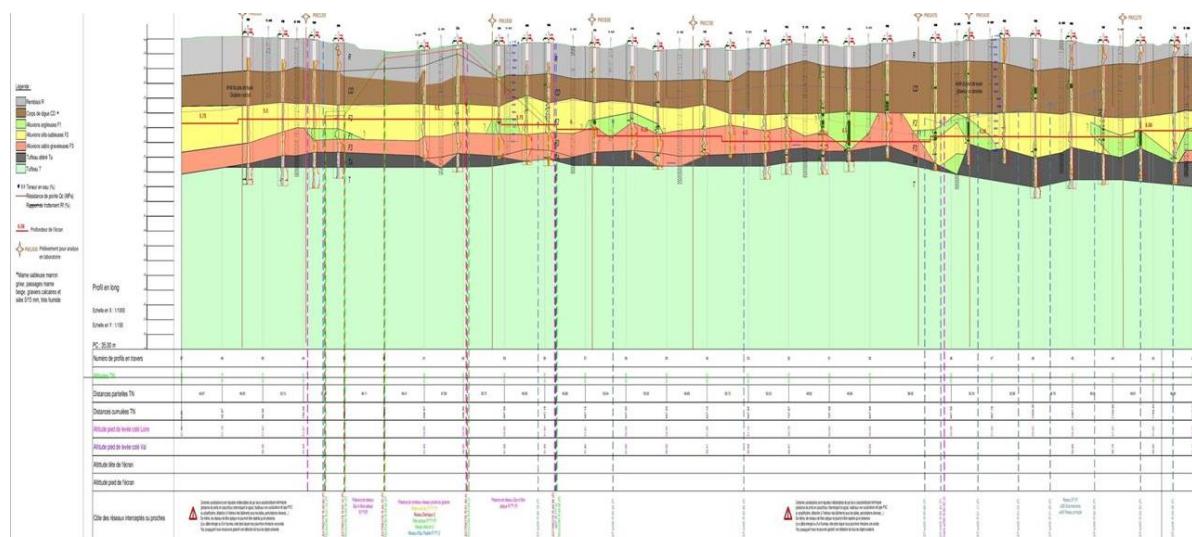


Figure 1. Extrait du profil en long géotechnique pour le chantier de Montlouis-sur-Loire en 2016

Les caractéristiques physiques des sols peuvent influencer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des mélanges sol-ciment. Pour l'analyse des résultats, il semble intéressant d'estimer de pourcentage de quelques catégories de sol (sable, argile, limon, calcaire...) au droit des sondages. Ces informations pourraient permettre de choisir la / les couches de sol à utiliser pour l'étude de formulation et aider à l'interprétation des essais effectués pendant et après la réalisation de l'ouvrage. La Figure 2 montre un exemple de répartition de la nature lithologique des sols le long d'un profil de renforcement.

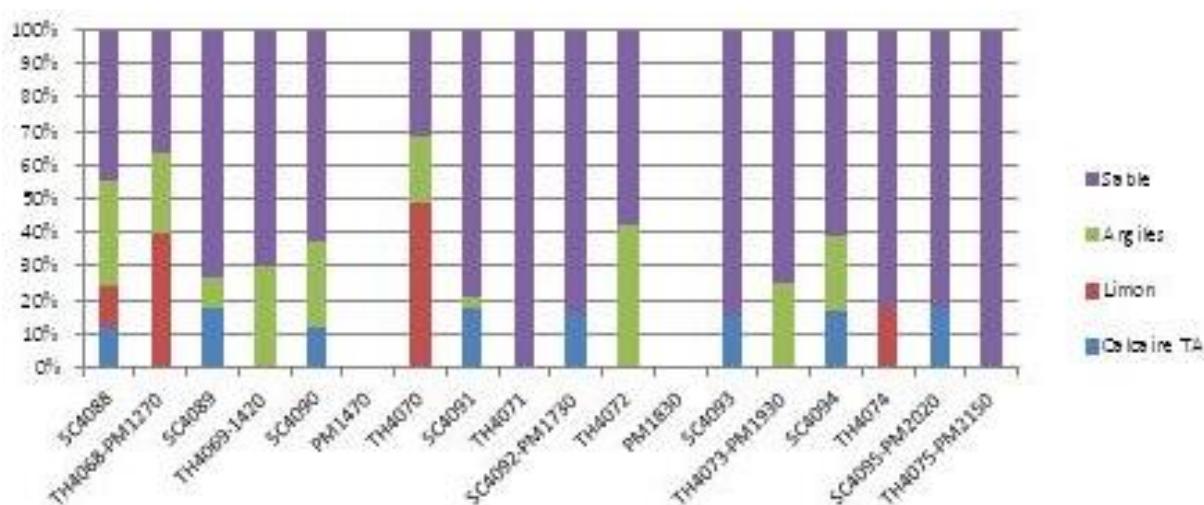


Figure 2. Exemple de répartition de la nature des sols le long du profil à renforcer

## 2.2. Méthode de réalisation de l'écran étanche et mesures *in situ*

### 2.2.1. Méthode

Les principales caractéristiques de la méthode sont les suivantes :

- “ la procédure repose sur les recommandations de la norme NF EN 14 679, Guimond-Barrett et al.,(2016), Projet RUFEX (2014 (a) et (b)) .
- “ le malaxage de l'écran en place est exécuté à l'aide d'une trancheuse équipée d'une lame et d'une chaîne animée d'un mouvement de rotation permettant d'incorporer le ciment au terrain
- “ la voie sèche modifiée est retenue : le ciment anhydre est mis en place dans une pré-tranchée ; l'ajout d'eau est réalisé par l'intermédiaire de la lame de la tracheuse-malaxeuse lors du malaxage
- “ le ciment utilisé est de type CEMIII/C 32,5 N-LH/SR avec un dosage compris entre 120 et 300kg/m<sup>3</sup>.
- “ l'épandage du ciment est contrôlé à la pique après épandage dans la prétranchée, la hauteur de ciment à épandre étant calculée à partir du dosage fixé et de la profondeur d'écran à réaliser
- “ l'eau utilisée est pompée dans la Loire après analyse chimique de celle-ci avec un ratio C/E de l'ordre de 0,2 . 0,5.
- “ le dosage en eau est adapté pour obtenir une rhéologie de mélange suffisante et pour permettre à la machine d'avancer dans de bonnes conditions ; le contrôle d'ajout d'eau se fait depuis la cabine de l'opérateur, qui ajuste le débit en fonction de la vitesse d'avancement de la machine
- “ les profondeurs de malaxage sont de l'ordre de 7,50 à 8,50 m

### 2.2.2. Enregistrement des paramètres de malaxage

La tracheuse est équipée d'un enregistreur de paramètres, développé par Soletanche Bachy, qui enregistre des paramètres notifiant le fonctionnement de la machine en temps réel. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- la vitesse d'avancement de la machine (m/h)
- la profondeur de la lame (m)
- le volume d'eau injecté (m<sup>3</sup>)
- la vitesse de la chaîne (m/s)
- l'indice de malaxage (1/100 cm)

### 2.2.3. Prélèvements de contrôle de la qualité du mélange

Suivant la nature du sol (plus ou moins sableux, limoneux ou argileux), sa teneur en eau naturelle, son degré de saturation, ses limites d'Atterberg et sa courbe granulométrique, les caractéristiques mécaniques et hydrauliques du mélange sol-ciment peuvent varier de manière significative. Des prélèvements de mélange en place sont donc effectués, au niveau de différents profils, et à deux profondeurs, pour confectionner des éprouvettes qui sont ensuite testées en laboratoire.

Les prélèvements se font directement dans la tranchée, dans le mélange à l'état frais, venant d'être malaxé. Les prélèvements sont effectués à l'aide d'un outil spécifique développé par l'entreprise Soletanche Bachy. Les éprouvettes sont vibrées de la même manière que des éprouvettes béton (NF EN 12390-2). Les éprouvettes sont remplies,

fermées, identifiées et stockées au laboratoire dans des conditions thermiques et hydriques constantes jusqu'aux échéances d'essais (7, 28 et 90 jours). Les essais de perméabilité sont réalisés à charge constante en cellule triaxiale. La résistance à la compression simple est déterminée conformément à la norme EN 13286-41 (AFNOR, 2003).

#### 2.2.4. Analyse des mesures

L'analyse des mesures effectuées in situ passe par le calcul :

- du volume de l'écran par mètre linéaire (prétranchée et tranchée de sol mixé), en  $\text{m}^3$
- du dosage en ciment C en  $\text{kg/m}^3$  de mélange
- du dosage en eau ajoutée E en  $\text{kg/m}^3$  de mélange

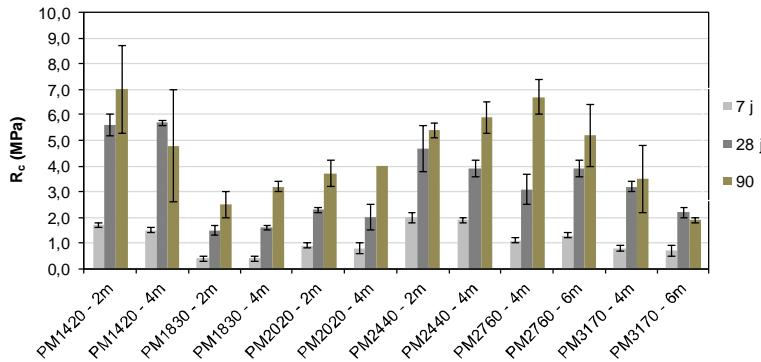
### 3 Suivi des paramètres machine

Le enregistrement des paramètres (paragraphe 2.2.2) est la une des étapes du contrôle effectué par l'entreprise pour le bon malaxage du matériau en place avec le liant et l'eau. Il en est de même pour le suivi des propriétés hydrauliques ( $k$ ) et mécaniques ( $R_c$ ) et de la teneur en eau.

Des prélèvements sont effectués tous les 200 à 400 m dans le but de réaliser des essais de suivi en termes de  $R_c$ ,  $k$  et teneur en eau à 7, 28 et 90 jours. Les mesures des paramètres  $R_c$  et  $k$  sont effectués au droit de chaque prélèvement et aux différentes profondeurs. Les résultats, dont quelques-uns sont montrés sur la Figure 3, permettent de vérifier que les critères d'acceptation du chantier sont bien atteints et de faire le lien avec le profil géotechnique. Les valeurs de  $R_c$  augmentent entre 7 et 90 jours (Figure 3a) tandis que les perméabilités diminuent (Figure 3b). De plus, les perméabilités les plus faibles sont mesurées pour les profils où les résistances sont les plus élevées (comparaison entre les profils 1420 et 2020 par exemple). En outre, il existe effectivement des différences significatives entre les différents profils pour les valeurs de  $R_c$  et de  $k$  qui peuvent avoir plusieurs causes (lithologie, conditions d'exécution, , présence de matière organique ).

Les mesures de  $R_c$  sur les prélèvements à deux profondeurs différentes présentent une certaine variabilité avec des valeurs minimales supérieures à 1,5 MPa à 28 jours (Figure 3a). Les valeurs moyennes sont du même ordre de grandeur. Il semble donc raisonnable de considérer qu'il y a peu de différences entre les résultats obtenus à ces deux profondeurs, ce qui est la une des caractéristiques du procédé Trenchmix®. Dans la suite de l'article, les valeurs mesurées aux deux profondeurs seront regroupées pour discuter des propriétés moyennes au niveau de l'ouvrage.

(a)



(b)

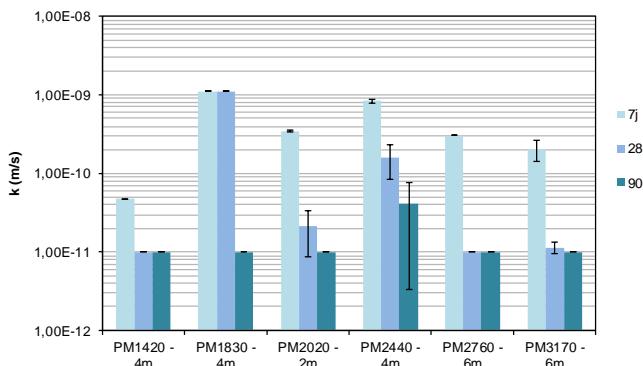


Figure 3. Evolution de  $R_c$  (a) et de  $k$  (b) pour les prélèvements effectués sur différents profils de l'ouvrage

#### 4 Synthèse des valeurs de $R_c$ , $k$ et teneurs en eau

La synthèse des résultats des essais réalisés sur les prélèvements effectués à l'état frais sur les sites de La Ville-aux-Dames (LVAD) et Montlouis-sur-Loire (MLSL) est donnée dans les Figures 4, 5 et 6. Rappelons que les propriétés requises pour le traitement étaient une perméabilité maximale de  $10^{-8}$  m/s ainsi qu'une résistance à la compression simple minimale de 1,5 MPa à 28 jours. Les valeurs présentées sont les moyennes et écarts-types à 7, 28 et 90 jours des valeurs mesurées sur tous les profils de chacun des deux chantiers.

Pour les deux sites, l'évolution de la perméabilité  $k$  montre que celle-ci diminue avec le temps de cure (Figure 4). Les valeurs minimales respectent le critère requis.

Les valeurs de teneur en eau massique  $w$  montrent peu de variation (Figure 5) et restent assez proches des valeurs mesurées lors des prélèvements. Ces observations permettent de valider la méthode de conservation des éprouvettes de chantier.

La résistance à la compression simple  $R_c$  augmente avec le temps de cure, jusqu'à 90 jours. Les valeurs minimales respectent le critère requis (Figure 6). Les écarts-type sont toutefois plus importants sur le site de MLSL que sur celui de LVAD.

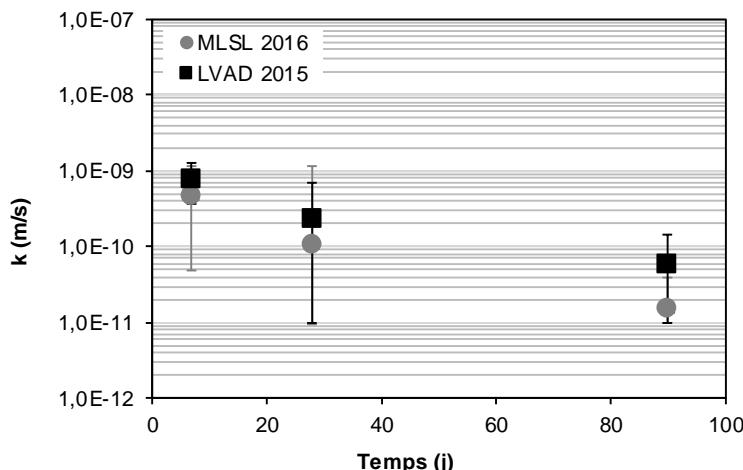


Figure 4. Evolution de  $k$  en fonction du temps

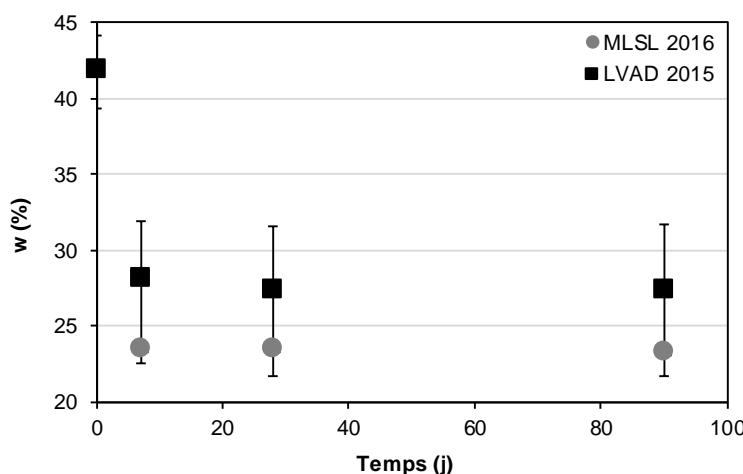


Figure 5. Evolution de  $w$  en fonction du temps

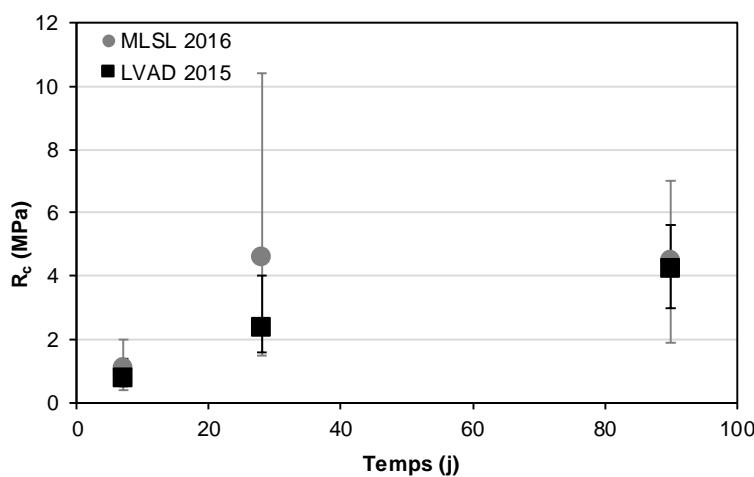


Figure 6. Evolution de  $R_c$  en fonction du temps

## 5 Conclusions et perspectives

La procédure de réalisation des tranchées de sol mixé a été décrite dans Le Kouby et al. (2016). Dans ce papier, le suivi de réalisation de l'ouvrage par procédé Trenchmix®, conformément aux recommandations et normes existantes, est présenté. Ainsi, lors de la réalisation d'ouvrages en sols traités par deep soil mixing, il est indispensable de mesurer

et contrôler les paramètres opératoires sur la machine : en effet, les paramètres d'exécution permettent d'obtenir une estimation des quantités de ciment et d'eau incorporées au mélange.

Trois paramètres sont étudiés en fonction du temps de cure à 7, 28 et 90 jours : k, w et R<sub>c</sub>. Les résultats montrent que pour les deux chantiers présentés ici les résultats des essais sur les prélèvements présentent une certaine variabilité. Les critères requis pour l'ouvrage en termes de perméabilité et de résistance à la compression simple du matériau traité sont atteints. Par ailleurs, il est à noter que le matériau prélevé à deux profondeurs différentes présente une résistance mécanique moyenne assez proche entre les différents profils de l'ouvrage, ce qui permet de valider l'une des caractéristiques de la technique de la tranchée de sol mixé.

De plus, dans la suite de ce travail, un des objectifs sera de représenter les paramètres k et R<sub>c</sub> en fonction de la coupe géologique effectivement rencontrée.. Puis, dans un second temps, on s'intéressera à la quantité d'eau injectée en fonction de cette même géologie. Cette procédure devrait permettre d'améliorer les méthodes de prévision des valeurs de k et R<sub>c</sub>.

## 6 Références bibliographiques

AFNOR. NF EN 13286-41. (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

AFNOR. NF EN 12390-2 (2012). Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.

European-Standard 2005. Execution of special geotechnical works - Deep Mixing. European Committee for Standardization (CEN) Brussels. Standard. NF EN 14679

Guimond-Barrett, A., Szymkiewicz, F., Le Kouby, A., Reiffsteck, P. (2016). Projet RUFEX . Recommandations pour l'étude de la formulation du matériau Deep mixing. Actes des JNGG pp. 130-137, Nancy.

Le Kouby, A., Saussaye, L., Fargier, Y., Boussafir, Y., Durand, E., Chevalier, C., Ananfouet, Y., Patouillard, S., Manceau, N., Gervais, L., Auger, N. (2016). Renforcement des digues de Loire par la technique du Deep soil mixing ; deux méthodes proposées . suivi sur deux ans. Actes des JNGG 2016, pp. 229-236, Nancy.

Fry JJ, Beguin R., Picault C., Mathieu F., Esnault A., Mosser JF (2015). Analyse et traitement de l'érosion interne. Procédés classiques et Nouveaux. International Commission On Large Dams, Stavanger, Norway

Mathieu F. et al. (2012). Dyke rehabilitation with a trencher : Recent applications in Europe. 4<sup>th</sup> International Conference on Grouting, Deep Foundation Institute, New Orleans, USA.

Monleau S. et Mathieu F. (2012) : Réhabilitation des Digues Fluviales et Maritimes : Lutte contre l'érosion interne par mise en place d'une paroi étanche. Revue Travaux n°891, pages 46-51

Renoud-Lias B., Ollier E. et Kachrillo JJ. (2006). Utilisation du procédé Trenchmix® pour la réalisation de grans étanches. Revue Travaux n°836, pages 49-53.

Projet RUFEX (2014a). Rapports projet FUI Rufex : Deep Soil Mixing - Guide pour le traitement des sols, 19 pages.

Projet RUFEX (2014b). Rapports projet FUI Rufex : Deep Soil Mixing - Recommandations pour la~~tude~~ de formulation du mélange, 17 pages.