



HAL
open science

Optimisation d'une nouvelle machine pour creuser des parois moulées

Ludovic Bertholon

► **To cite this version:**

Ludovic Bertholon. Optimisation d'une nouvelle machine pour creuser des parois moulées. 2008.
hal-00590954

HAL Id: hal-00590954

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00590954>

Submitted on 5 May 2011

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.



MINES PARIS
ParisTech

CENTRE DE GEOSCIENCES



RAPPORT D'OPTION

**OPTIMISATION D'UNE NOUVELLE MACHINE
POUR CONSTRUIRE DES PAROIS MOULEES**

Ludovic BERTHOLON

Option Sol et Sous-sol
REF : *LBERO080702*

Juillet 2007

Résumé

On décrit dans ce rapport l'amélioration d'une nouvelle machine pour creuser des parois moulées, en particulier l'allègement et la simplification de celle-ci. Après avoir présenté le contexte des projets européen et français qui ont vu l'évolution de cette machine, on propose un nouveau design du module qui contribue principalement à l'alourdir. Le développement de ce design s'opère en deux temps :

- tout d'abord, une série d'expériences permet de déterminer un paramètre essentiel : le coefficient apparent de frottement de la machine sur les parois de la tranchée creusée par la machine ;
- ensuite, le dimensionnement concret du module en s'appuyant sur une étude statique de la machine et une étude de butée de la tranchée.

L'enchaînement de ces deux études – expérimentale et théorique – permet de montrer que la masse et la complexité de ce module peuvent être largement réduites.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans cette étude, notamment les chercheurs du centre de Géosciences Dimitri Gordine et Hedi Sellami. Mes remerciements vont aussi à Anne Levesque, Cyril Leipp et Joël Maupin de la halle d'essais qui m'ont permis de mettre en place et de réaliser mes essais de frottement durant un mois. Je remercie également Daniel Perpezat de l'entreprise Solétanche-Bachy pour son écoute et ses conseils. Enfin je suis très reconnaissant envers les responsables de l'option « Sols et Sous-Sol » pour la qualité et le sérieux de leur encadrement.

Introduction

Solétanche Bachy est une entreprise spécialisée dans les technologies du sous-sol. Elle réalise environ cinquante pourcents de son activité en parois moulées. Les machines utilisées pour creuser des parois moulées – benne hydraulique et hydrofraise – ont été inventées il y a plus de vingt ans par Solétanche-Bachy et sont constamment optimisées depuis lors. Néanmoins il n'y a pas eu de saut technologique depuis l'invention de l'hydrofraise, et Solétanche-Bachy commence à être rattrapé par ses concurrents.

Pour développer un concept de rupture pour creuser les parois moulées, Solétanche-Bachy a été à l'origine du projet européen SCOUT (Sustainable Construction Of Underground Transport infrastructures), de 2005 à 2007. La liste des inconvénients des machines actuelles – fonctionnement séquentiel, utilisation de boue, besoin de beaucoup de place en surface – a abouti à l'idée d'une machine reprenant le concept du tunnelier. Ainsi, le prototype de SCOUT creuse une paroi en continu en n'utilisant pas de boue pour mariner les déblais.

La suite du projet SCOUT se passe au niveau français avec le projet TRACI (TRAnchées Couvertes Industrielles) du pôle de compétitivité Ville et Mobilité Durables. Ce travail d'option s'inscrit au sein du projet TRACI, et a pour objectif d'optimiser le prototype de machine développer et testé lors du projet SCOUT. L'un des inconvénient principaux notés lors des essais du prototype est son poids : 42 tonnes pour une tranchée de 8 mètres de haut. Sur ces 42 tonnes, le module de poussée qui permet à la machine de se stabiliser dans la tranchée et d'avancer compte pour 17 tonnes ; il contient de plus de nombreux vérins qui complexifient le système hydraulique. L'enjeu de ce travail sera de réduire de manière drastique le poids et la complexité de ce module.

Ce rapport s'articulera en trois parties :

- 1- La position du problème, les résultats et lacunes du projet SCOUT et les attentes précises du projet TRACI
- 2- Les résultats expérimentaux des essais de frottement réalisés à la halle du Centre de Géosciences pour caractériser les relations entre le système d'ancrage de la machine et les parois de la tranchée
- 3- Le dimensionnement du module de poussée

1. Présentation du projet

1.1. La paroi moulée

1.1.1. Description

Une paroi moulée est une tranchée creusée dans le sol destinée à être remplie de béton armé. Sa largeur est comprise entre 0,5 et 1,5 mètres, sa profondeur peut aller jusqu'à 120 mètres.

Cet ouvrage est utilisé pour de nombreuses constructions différentes :

- parking souterrain : les murs du parking sont construits en premier grâce aux parois moulées ; ensuite l'excavation est réalisée et les talus autour de la fouille restent stables grâce aux parois ;
- tunnel en tranchée couverte : les murs sont de nouveau réalisés avec des parois moulées ;
- bassin d'orage ;
- fondation de barrages ;
- ...

La Figure 1-1 présente les différentes phases de construction d'une paroi moulée.

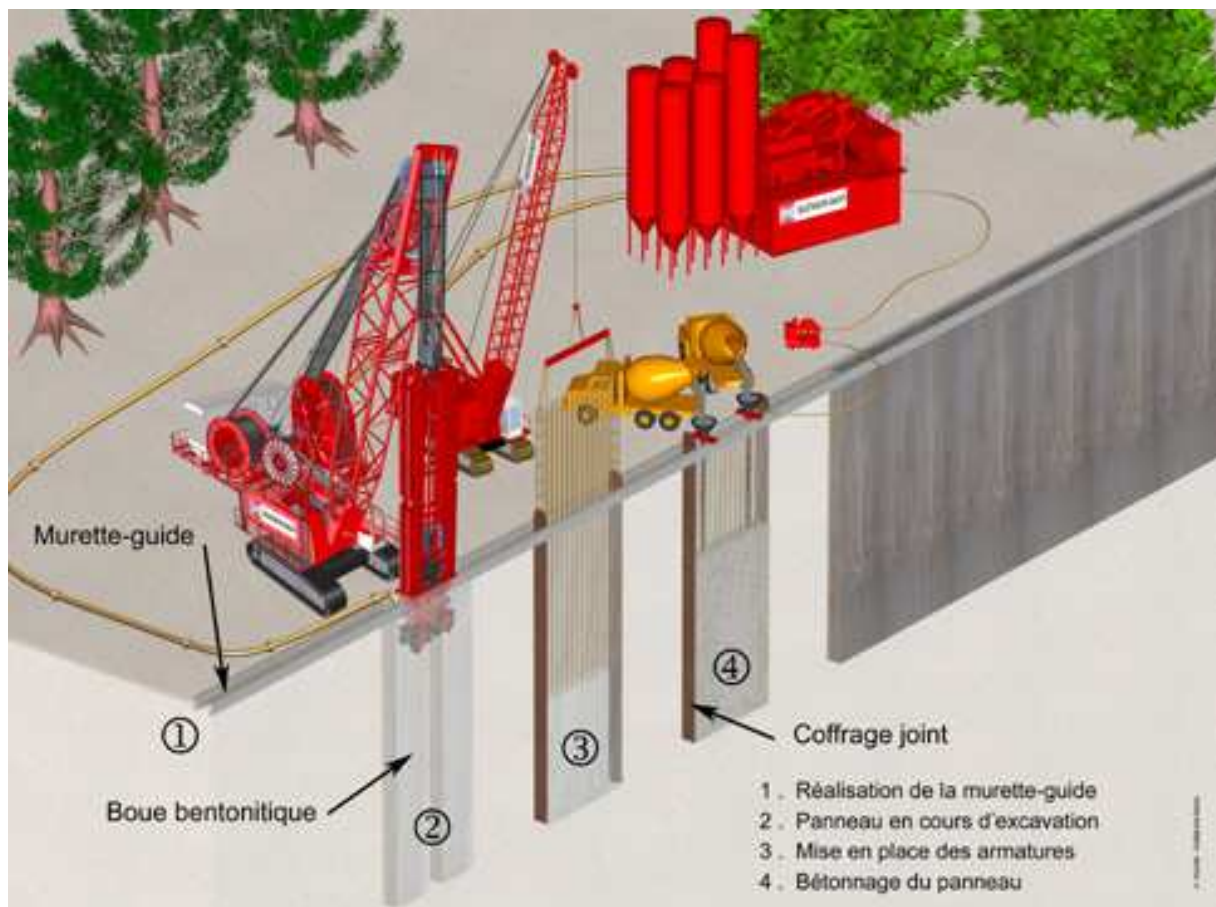


Figure 1-1 : Construction d'une paroi moulée

La première phase de la construction, notée en (1) sur la Figure 1-1 est la construction d'une murette qui guidera le creusement de la tranchée. Puis un panneau est creusé au moyen d'une benne (hydraulique ou à câbles) ou d'une hydrofraise. Ce creusement est réalisé avec de la boue pour assurer la stabilité de la tranchée. Les armatures métalliques sont ensuite mises en place (3) avant de couler le béton avec un tube plongeur (4).

L'enchaînement du creusement des panneaux est présenté sur la Figure 1-2.

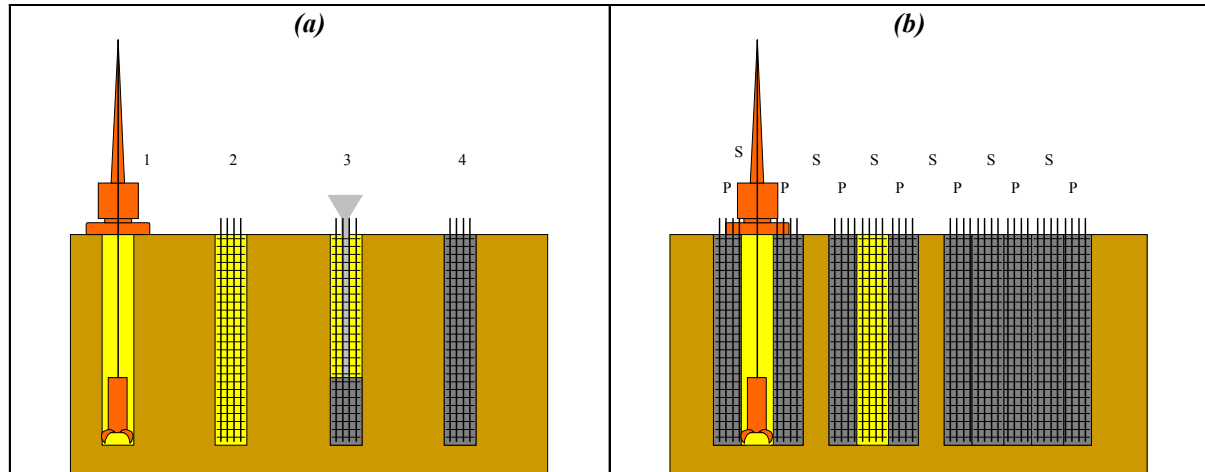


Figure 1-2 : Phases de creusement des panneaux (a : panneaux primaires ; b : panneaux secondaires)

La Figure 1-2 montre un creusement en deux phases : tout d'abord le creusement de panneaux séparés d'un panneau, puis ensuite le creusement des espaces laissés entre les panneaux précédemment creusés. Ce procédé permet au béton de prendre avant de creuser un panneau adjacent.

1.1.2. Inconvénients du procédé

Ce procédé présente plusieurs inconvénient :

- tout d'abord le creusement discontinu des panneaux empêche une utilisation optimale de la journée de travail. En effet on pourrait creuser en une journée deux panneaux et demi, mais on ne peut commencer le troisième et le laisser la nuit, on doit creuser un nombre discret de panneaux ;
- l'emploi de boue pour maintenir les parois et transporter les cuttings (à traiter dans la centrale) est très pénalisant. En effet, la centrale à boue prend beaucoup de place et est très bruyante, ce qui entraîne le mécontentement des voisins du chantier. De plus les terrains en contact avec les boues peuvent être considérés dans certains pays comme des terrains pollués que l'on ne peut pas simplement mettre en décharge. Enfin la boue implique une plate-forme de travail glissante, source d'accidents ;
- le dispositif prend beaucoup de place en surface, et crée de nombreux désagréments lorsque le chantier a lieu en plein centre-ville.

Toutes ces remarques montrent la nécessité de développer un nouveau procédé.

1.2. Le projet SCOUT

Entre le 1^{er} janvier 2005 et le 31 décembre 2008, le projet européen SCOUT (*Sustainable Construction Of Underground Transport infrastructures*) a été mené sous l'impulsion de l'entreprise Solétanche Bachy.

Solétanche Bachy est une entreprise générale de travaux et technologies du sol, qui maîtrise l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et dépollution des sols... Son chiffre d'affaires est supérieur à 1 milliard d'euros, et elle réalise en outre une croissance moyenne de 10% par an depuis 20 ans. L'entreprise compte 4500 collaborateurs permanents dans le monde et a à son actif des réalisations dans plus de 100 pays. Elle

Solétanche Bachy réalise cinquante pourcents de son activité en paroi moulées, ce qui explique que cette entreprise s'intéresse de très près à ce procédé. Les machines utilisées aujourd'hui, notamment l'hydrofraise, ont été inventées par Solétanche Bachy il y a plus de vingt ans. Elles ont subi de nombreuses améliorations successives au fil des années mais n'ont jamais réellement connu de saut technologique depuis leur invention, ce qui implique que les concurrents commencent à rattraper l'entreprise dans ce domaine. Ajoutant à ceci les inconvénients listés précédemment du procédé actuel de construction de paroi moulée, Solétanche Bachy a décidé de monter un projet européen pour développer un concept de rupture.

Le projet SCOUT avait pour objectif de développer une machine donc le schéma de fonctionnement est présenté en Figure 1-3.

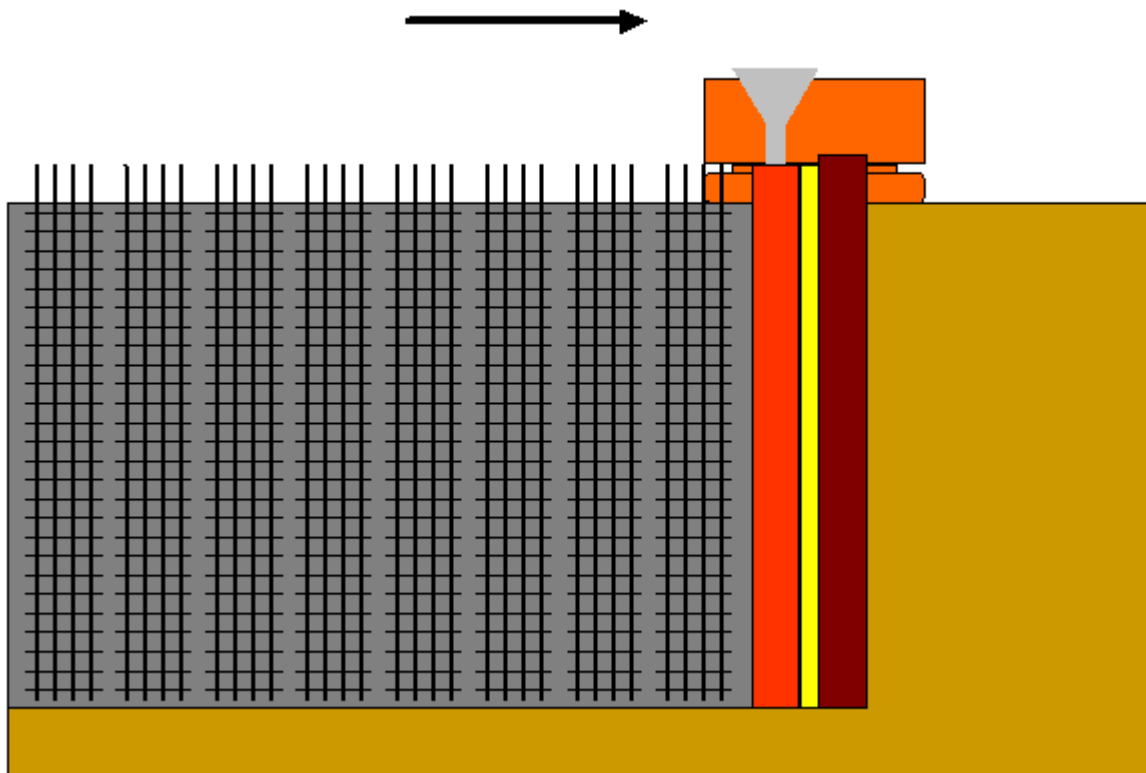


Figure 1-3 : Concept de la machine du projet SCOUT

La machine présentée en Figure 1-3 est fondée sur le principe du tunnelier, mais en modifiant la forme circulaire par une forme de tranchée. La machine avance continuellement en abattant le terrain à l'avant et en construisant la paroi à l'arrière. Le prototype auquel a abouti le projet est présenté sur la Figure 1-4, lors de ses essais de validation à Montereau en juin 2007.



Figure 1-4 : Le prototype du projet SCOUT

Conçu pour creuser une tranchée d'une hauteur de 8 mètres, le prototype « SCOUT » de la Figure 1-4 présente trois chambres isolées l'une de l'autre :

- à l'avant se trouve la chambre d'abattage, composée d'un tambour d'hydrofraise porté sur un kelly (lourd mat qui guide le tambour et lui donne le poids nécessaire pour abattre le terrain, en rouge). Les cuttings sont mélangés avec de la mousse pour créer une sorte de pâte qui garantira la stabilité de la tranchée à l'instar des tunneliers à pression de terre. L'élément en blanc est une vis qui permet le marinage des déblais. Elle est ouverte sur toute la hauteur pour permettre son approvisionnement en pâte ;
- au milieu (en orange) se trouve le module de poussée et de direction, qui permet à la machine d'avancer dans la tranchée, de se stabiliser dans la tranchée et de négocier des virages ;

- on a enfin à l'arrière la chambre de bétonnage sensée accueillir le béton frais qui constituera la paroi. Le grand élément noir que l'on remarque sur la Figure 1-4 est le joint qui crée l'étanchéité entre les chambres de direction et de bétonnage. Lors des essais de validation, le bétonnage dans cette chambre n'a pas été testé.

Le Tableau 1-1 présente le niveau de satisfaction sur les différents éléments du prototype SCOUT lors des essais de validation en fonction de leur importance dans le procédé.

	Criticité nulle ou faible	Criticité moyenne	Criticité élevée
Insuffisant			Etanchéité pâte/boue Taille de la machine
Faible	Skid (supports murettes guides) Tableau de contrôle	Vérins de poussée Module de poussée (conception générale)	Mécanisme d'orientation Cinématique
Moyen		Ouvertures du tube de vis (entrée de la pâte) Vérins de grippeurs	Kelly (force verticale sur le tambour)
Satisfaisant	Pics de coupe Treuil (levage du tambour)	Grippeurs (Réaction aux efforts de coupe dans le panneau) Vérins de poussée (rétraction du module arrière) Supervision	Guidage du kelly (sur le tube de vis)
Très satisfaisant	Convoyeur à bande	Moteur de coupe (mélange sol/mousse) Motorisation de la vis	Mousse (génération de la pâte) Vis de marinage

Tableau 1-1 : Matrice des résultats du prototype du projet SCOUT

On remarque dans le Tableau 1-1 que la stabilité du front sous pression de terre n'a pas posé de problèmes. En revanche on voit que de nombreux problèmes sont apparus.

Pour poursuivre le projet SCOUT, Solétanche Bachy a monté un projet français, le projet TRACI.

1.3. Le projet TRACI – le sujet du travail d'option

Le projet TRACI (*TR*achées *C*ouvertes *I*ndustrielles) se déroule sur trois ans, de 2008 à fin 2010. Il a pour but, au sein du pôle de compétitivité Ville et Mobilité Durables, d'industrialiser la construction de tranchées couvertes, et donc de continuer le développement de la machine créée lors du projet SCOUT.

La différence principale de procédé avec le projet SCOUT est l'abandon de l'idée de couler du béton en continu à l'arrière de la machine. La paroi sera constituée de plaques de béton préfabriquées développées par la société Fehr Technologies IDF.

Le rôle du Centre de Géosciences (avec Solétanche Bachy) dans ce projet est l'amélioration du prototype SCOUT.

Dans le Tableau 1-1, on remarque que la conception générale du module de poussée est à reprendre. Ce module de poussée pèse 17 tonnes, soit 40% de la masse totale de la machine. Repenser sa conception dans un souci d'allègement permettrait de résoudre plusieurs problèmes en même temps.

Le travail d'option s'attachera donc à reprendre la conception générale du module de poussée de la machine est comme objectif de l'alléger.

2. Les essais

La première étape du travail consiste à évaluer les relations entre la tranchée et la machine, pour reprendre son dimensionnement. Ces relations seront estimées expérimentalement grâce à des expériences à la halle d'essais du Centre de Géosciences.

2.1. Objectif des essais

Durant le cycle de travail, la machine doit être maintenue immobile dans la tranchée. Pour ce faire, le prototype du projet SCOUT a utilisé un système de plaques qui se déploient et viennent contre la tranchée (voir Figure 2-1). Ces plaques sont appelées les « grippeurs ».

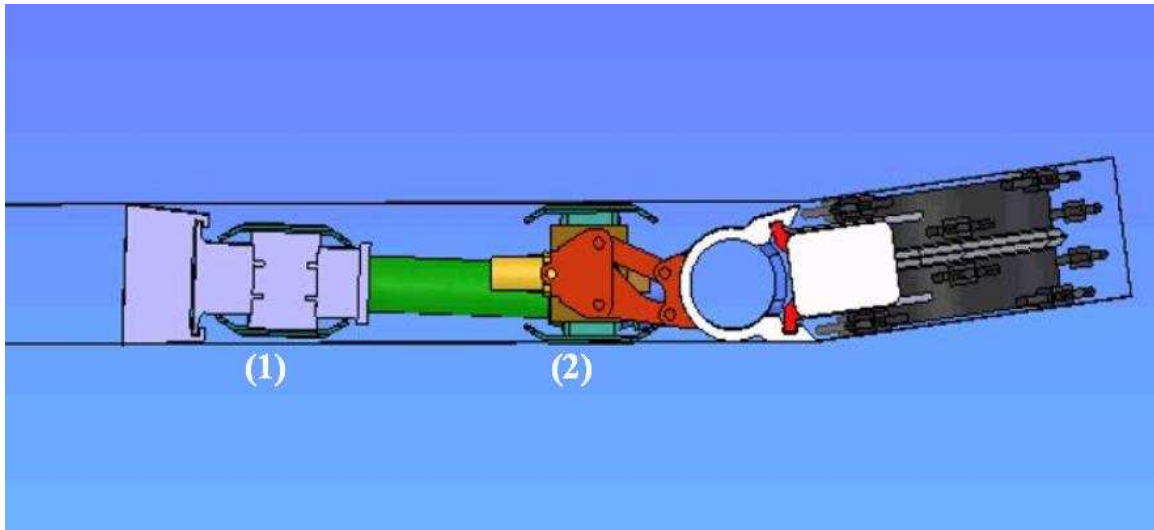


Figure 2-1 : Vue de haut du prototype du projet SCOUT ; (1) grippeurs arrières, (2) grippeurs avant

Ces grippeurs sont de grandes plaques en acier particulièrement lourdes dans le module de poussée. Etudier leur dimensionnement pourrait permettre de faire perdre rapidement une masse élevée à la machine.

Sur la Figure 2-1 on remarque que deux systèmes de grippeurs ont été utilisés dans le projet SCOUT : les grippeurs à l'arrière (1) et à l'avant (2). Ce choix sera remis en cause dans une partie ultérieure ; l'objectif de cette étude est de quantifier les relations entre les grippeurs et les parois de la tranchée en fonction de la géométrie de ces grippeurs.

La Figure 2-2 synthétise ces relations à quantifier.

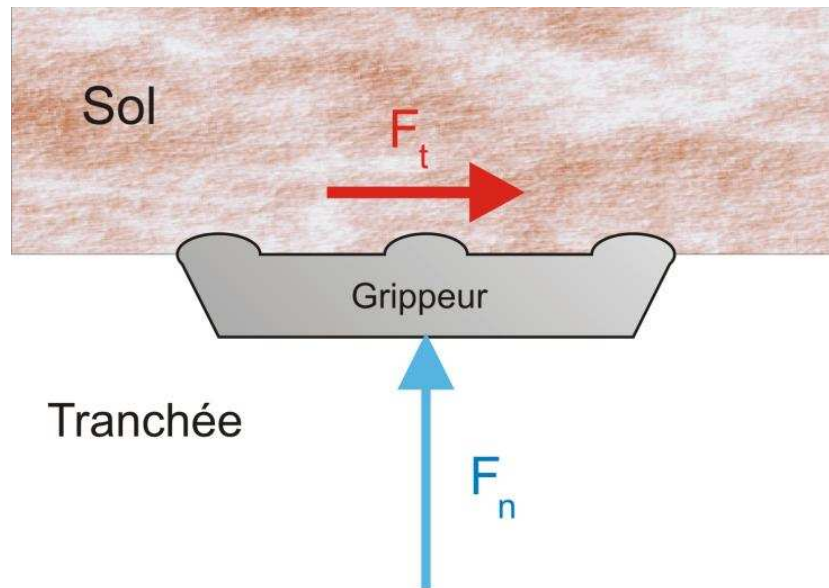


Figure 2-2 : Bilan des forces sur le gripeur

Deux forces s'appliquent sur les gripeurs : la force normale F_n , qui est transmise grâce à des vérins, et la force tangentielle F_t , qui correspond à la réaction du sol. En considérant un modèle de frottement simple, on obtient : $F_t = k.F_n$ avec k le coefficient de frottement gripeur/sol. Même si nous n'avons pas dans ce cas précis un modèle de frottement simple (des phénomènes de cisaillement du sol par le gripeur doivent être pris en compte), le rapport entre F_t et F_n existe. Pour une représentation plus simple des résultats, ce rapport sera nommé coefficient « apparent » de frottement.

L'objectif des essais est de déterminer la valeur de ce coefficient k en fonction de différents sols et de différentes géométries de patins.

En termes de dimensionnement de la machine, F_t est supposée connue (force de coupe, pression de terre dans la chambre d'abattage...). Il s'agit de la force à équilibrer pour éviter que la machine ne bouge dans la tranchée. Pour équilibrer cette force, il faut appliquer une force normale F_n suffisamment élevée. La détermination du coefficient apparent de frottement permet de déterminer la force normale à appliquer pour empêcher la machine de bouger.

2.2. Description des essais

2.2.1. Le montage et le protocole

Les expériences ont été réalisées à la halle d'essais du centre de Géosciences de l'Ecole des Mines, à Fontainebleau.

Le dispositif utilisé est celui de la boîte de Casagrande pour les roches (voir Figure 2-3). Le montage d'origine a été modifié pour réaliser les essais qui nous intéressent : la partie normalement destinée à recevoir l'éprouvette à cisailier a été enlevée et remplacée par une simple boîte qui contiendra les différents matériaux testés. Le grippeur est représenté par un patin de 196×60mm (voir 2.2.2 *Les différents patins testés*). Comme on peut le voir sur la Figure 2-4, le patin à tester est posé sur le matériau contenu dans la boîte, et soumis à une charge normale. On exerce ensuite une force tangentielle croissante sur la patin au moyen d'une pompe hydraulique, ce qui entraîne le mouvement de translation du patin.

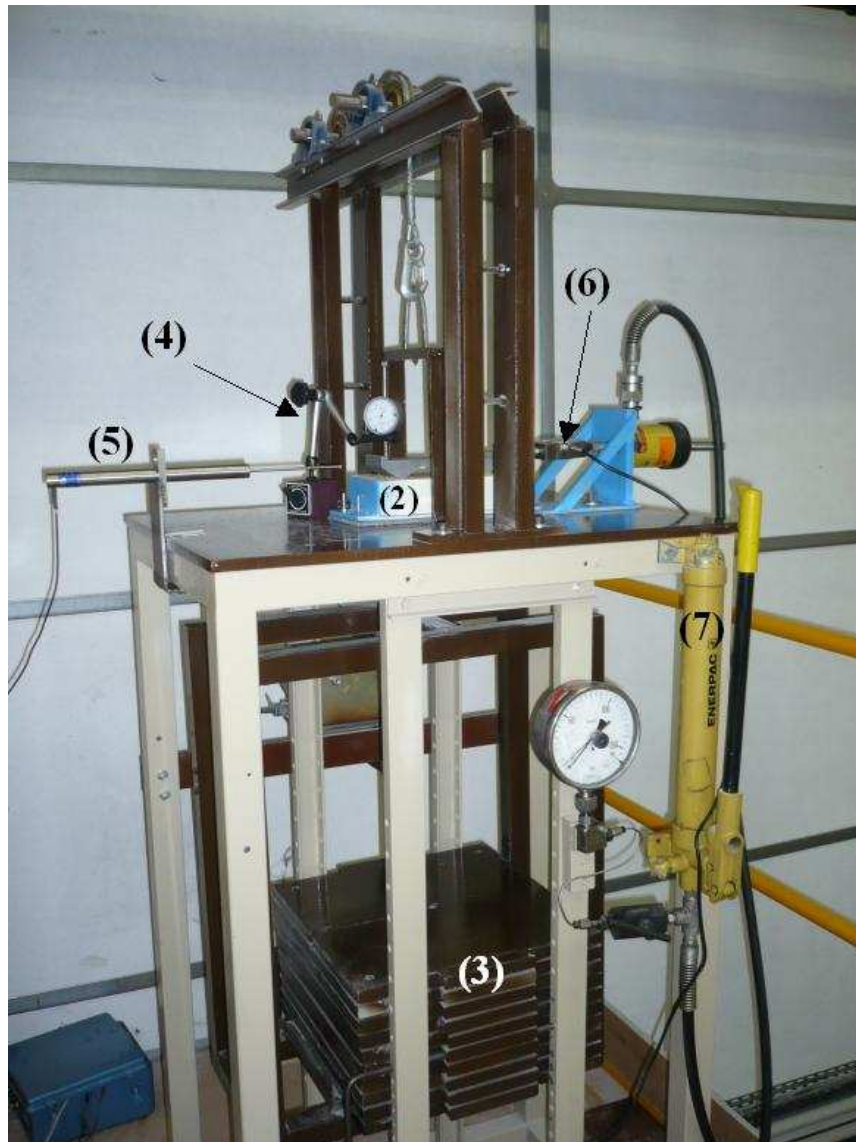


Figure 2-3 : Dispositif expérimental des essais (vue globale)

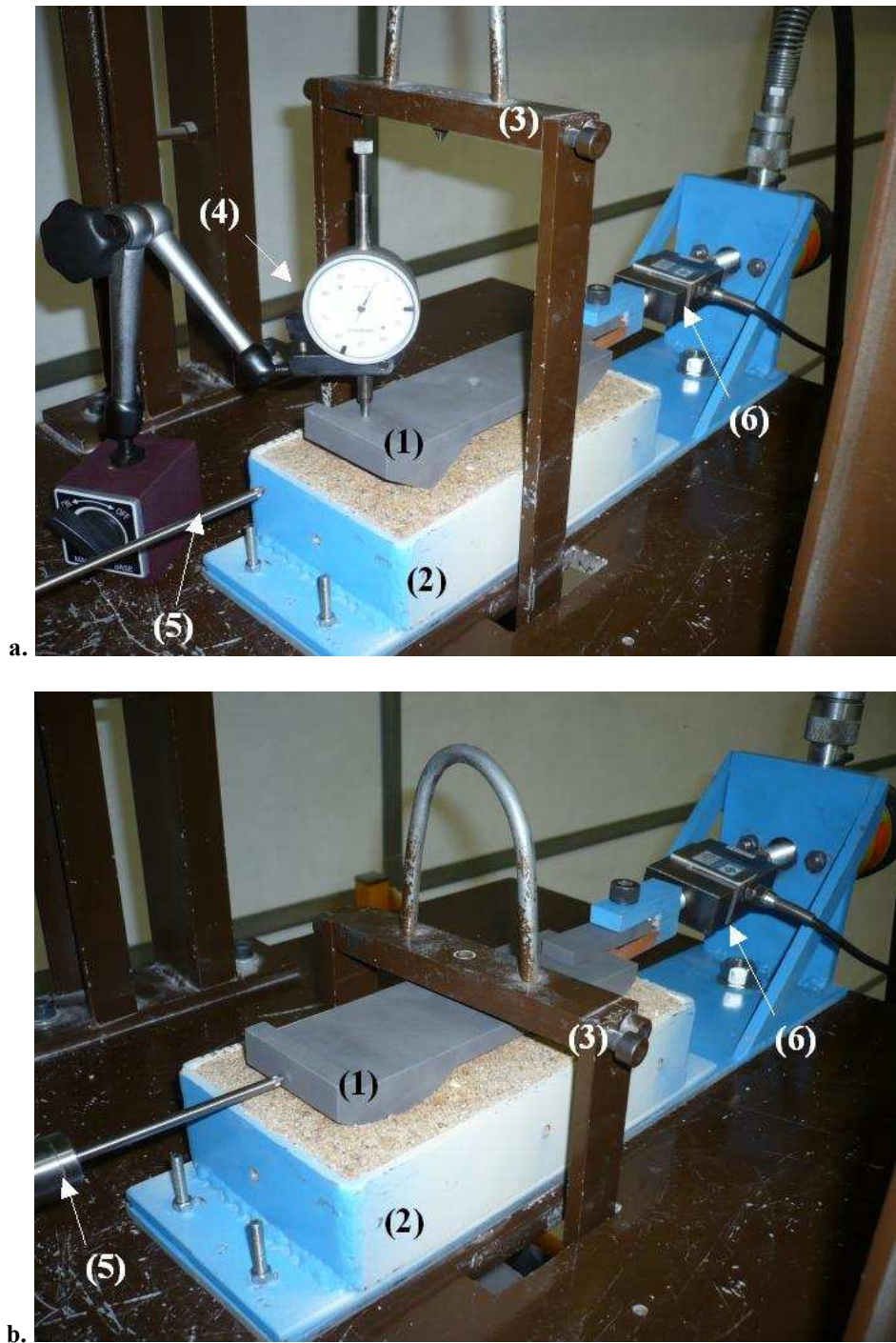


Figure 2-4 : Dispositif expérimental des essais, vue rapprochée (a. avant la mise en charge ; b. durant l'acquisition)

Les éléments du montage repérés sur la Figure 2-3 et la Figure 2-4 sont :

- (1) : patin ;
- (2) : boîte qui contient le matériau ;
- (3) : charge appliquée sur le patin ;
- (4) : comparateur ;
- (5) : capteur de déplacement ;
- (6) : capteur de force ;
- (7) : pompe hydraulique.

Les grandeurs mesurées lors d'un essai sont données dans le Tableau 2-1.

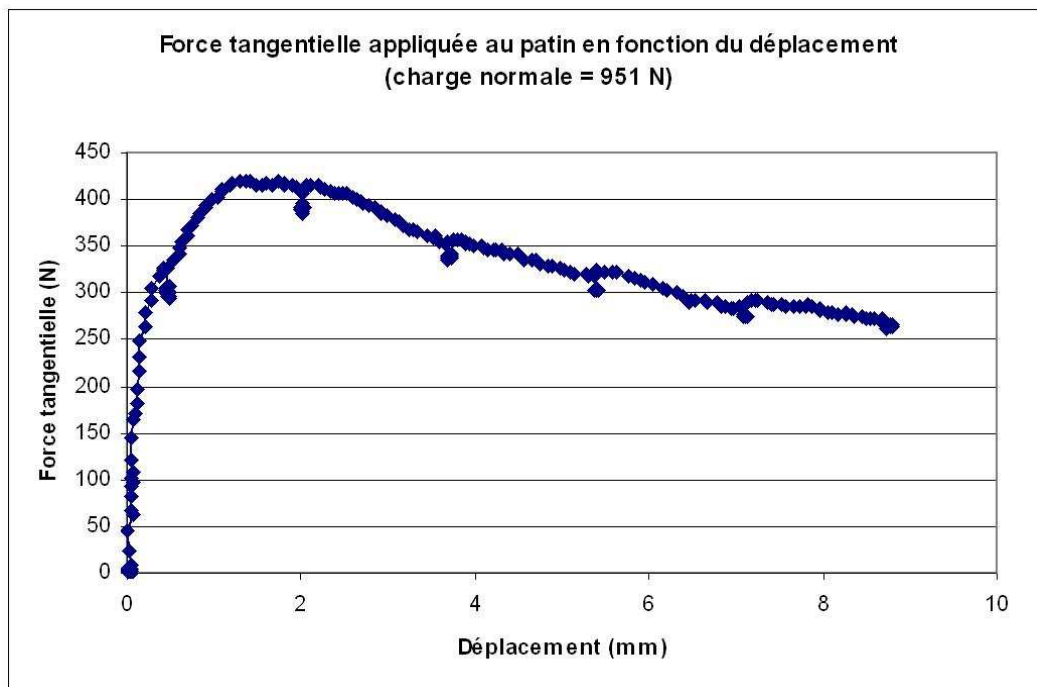
Grandeur	Symbole	Unité	Description
Charge normale	F_n	Newton (N)	Charge à laquelle est soumis le patin ; peut prendre les valeurs 202 N, 447 N, 693 N, 938 N et 1183 N, auxquelles il faut rajouter le poids du patin
Force tangentielle	F_t	Newton (N)	Grandeur acquise numériquement à la fréquence 7,5Hz
Enfoncement	e	mm	Grandeur mesurée lors de la mise en charge du patin au moyen d'un comparateur
Déplacement	d	mm	Grandeur acquise numériquement à la fréquence 7,5Hz

Tableau 2-1 : Grandeurs mesurées et acquises lors d'un essai

Le protocole expérimental est le suivant :

- préparer la boîte : la remplir avec le matériau à tester ;
- disposer le patin au milieu de la boîte ;
- mettre le comparateur en place ;
- charger le patin ;
- mettre en place les capteurs de déplacement et de force ;
- déclencher l'acquisition ;
- actionner la pompe pour déplacer le patin ;
- arrêter l'acquisition.

Une courbe obtenue lors d'un essai est présentée sur le Graphique 2-1.



Graphique 2-1 : Courbe obtenue lors d'un essai

Le Graphique 2-1 représente les deux grandeurs acquises lors de l'essai, l'une en fonction de l'autre. Une courbe correspond à une charge normale donnée. La valeur de l'enfoncement e est notée à part. La forme de la courbe dépend du matériau testé. Les phénomènes d'hystérésis que l'on remarque (pour $d= 0,5 \text{ mm} ; 2 \text{ mm} ; 3,7 \text{ mm} ; 5,4 \text{ mm}$ et $7,1 \text{ mm}$) correspondent aux coups de pompe donnés pour faire avancer le patin : ils induisent un cycle de décharge/charge du matériau. On remarque que la valeur de la force tangentielle après la charge est la même que celle avant la décharge, ce qui assure la fiabilité de l'essai.

Pour chaque essai, c'est-à-dire pour chaque jeu de paramètres {géométrie du patin, charge normale appliquée, matériau}, on détermine la force tangentielle correspondante (sur le Graphique 2-1, on note $F_t = 420\text{N}$). La détermination de F_t est expliquée dans la partie 3 sur les résultats. Enfin, pour chaque patin associé à un matériau, on trace la courbe F_t en fonction de F_n et on l'approche par une droite pour déterminer le coefficient apparent de frottement k .

2.2.2. Les différents patins testés

La première série de tests lors du projet SCOUT a permis de montrer que le caoutchouc n'était pas adapté aux patins car il ne présentait aucun frottement sur un matériau de type argile mouillée. Tous les patins testés lors de cette campagne sont donc en acier.

De nouveau lors du projet SCOUT, les avantages d'un patin avec un profil non plat ont été mis en avant. Un des objectifs lors de ces tests est de dégager une géométrie de profil qui engendrera un maximum de frottement.

Le patin profilé testé lors du projet SCOUT avait une géométrie ondulée comme on peut le voir sur la Figure 2-5.



Figure 2-5 : Patin profilé testé lors du projet SCOUT

Pour les tests effectués dans le cadre du projet TRACI, une géométrie plus simple a été choisie, afin de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre, et de pouvoir jouer sur des paramètres « simples ». En effet, lorsque le patin de la Figure 2-5 est soumis à une charge normale, s'enfonce dans le matériau et est déplacé tangentiellement, on peut difficilement modéliser s'il se produit un simple phénomène de frottement du patin sur le matériau, ou s'il se rajoute un cisaillement du matériau par le patin. Les deux phénomènes entrent en jeu, mais on ne peut pas savoir avec quelle proportion.

Les patins à tester auront ainsi des profils en « triangle », avec des pics (voir exemple Figure 2-6). Tous les patins font 196mm de longueur et 60 mm de largeur (taille adaptée à la boîte).

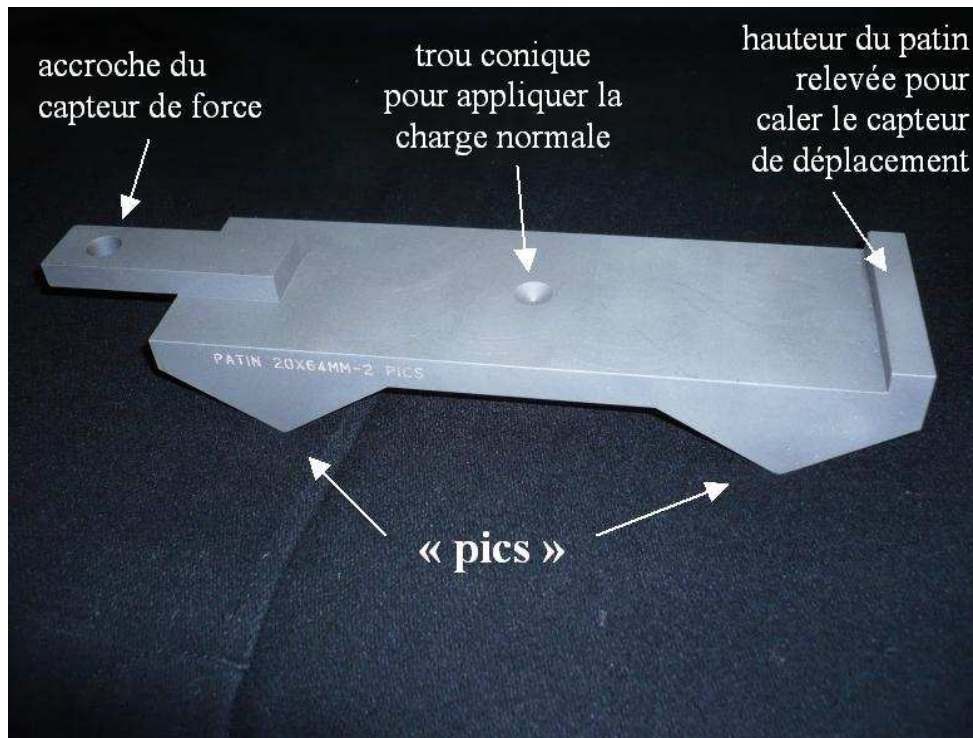


Figure 2-6 : Exemple de patin testé lors des essais

Six patins ont été réalisés, en faisant varier les paramètres suivants :

- nombre de pics (n) : 2 ou 3 ;
- profondeur de ces pics (p) : 10, 20 ou 30 mm ;
- largeur de ces pics (l) : 32 ou 64 mm.

Les patins sont nommés p-l-n avec les notations présentées ci-dessus (par exemple le patin de la Figure 2-6 sera nommé « patin 20-64-2 »).

Les patins du prototype du projet SCOUT ont de profils de 20mm de profondeur car ils ne doivent pas déformer la tranchée sur plus de 20mm (cahier des charges discuté avec Solétanche Bachy). Le patin de 20mm de profondeur est donc le patin de référence. Il est entouré des patins de 10mm et 30mm de profondeur pour bien évaluer l'influence de ce paramètre. La largeur maximale des pics (64mm) a été choisie pour permettre de positionner 3 pics sur la longueur du patin, et parce qu'elle se rapproche de la largeur des reliefs des patins du projet SCOUT.

Les six patins sont présentés sur la Figure 2-7. Les plans de ces patins sont donnés dans l'Annexe A : *Plan des patins*.

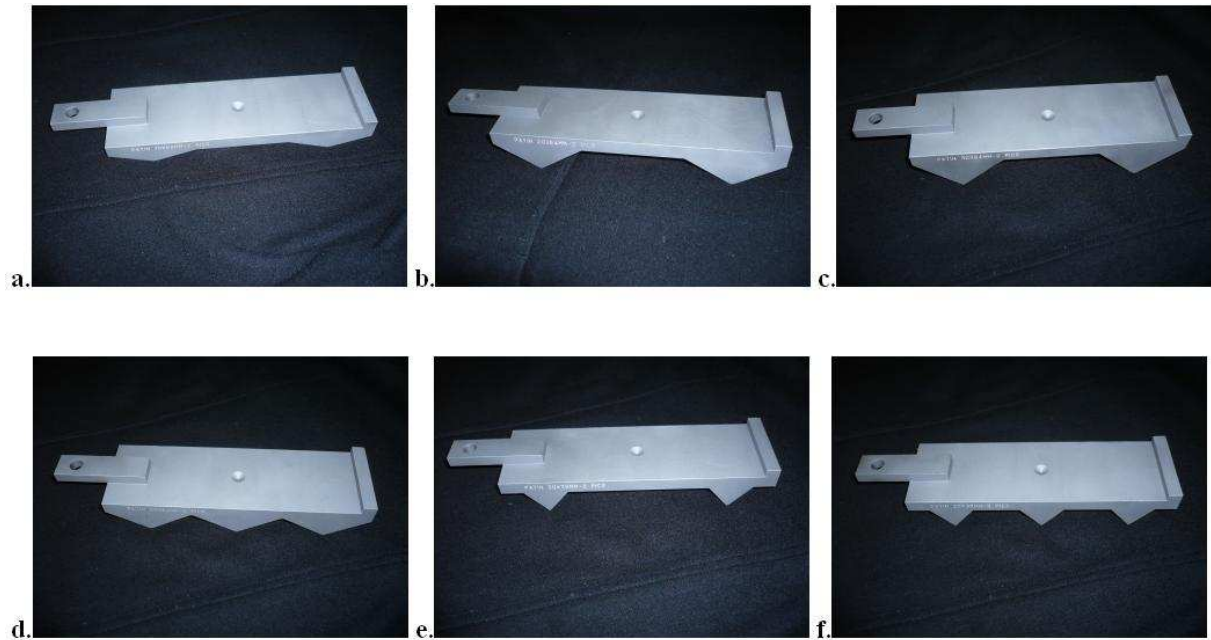


Figure 2-7 : Les six patins profilés testés (a. 10-64-2 ; b. 20-64-2 ; c. 30-64-2 ; d. 30-64-3 ; e. 20-32-2 ; f. 20-32-3)

En plus de ces six patins profilés, les essais ont été refaits avec le patin plat utilisé pour les essais du projet SCOUT, afin d'étudier de nouveau les différences de réactions.

On verra dans la partie 2.3 *Les résultats* qu'un paramètre crucial est l'angle d'attaque β des pics (voir définition sur la Figure 2-8). Le Tableau 2-2 récapitule les différentes caractéristiques géométriques des patins, ainsi que l'angle β .

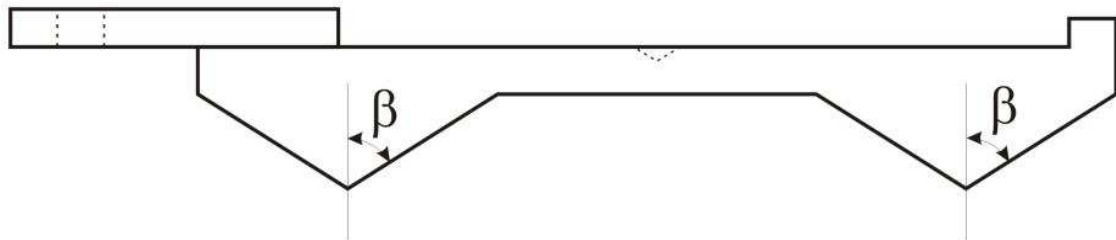


Figure 2-8 : Définition de l'angle β d'un pic

Patin	Nombre de pics n	Profondeur des pics p (mm)	Largeur des pics l (mm)	Angle β (°)
10-64-2	2	10	64	73
20-64-2	2	20	64	58
30-64-2	2	30	64	47
20-64-3	3	20	64	58
20-32-2	2	20	32	39
20-32-3	3	20	32	39

Tableau 2-2 : Récapitulatif des caractéristiques géométriques des patins

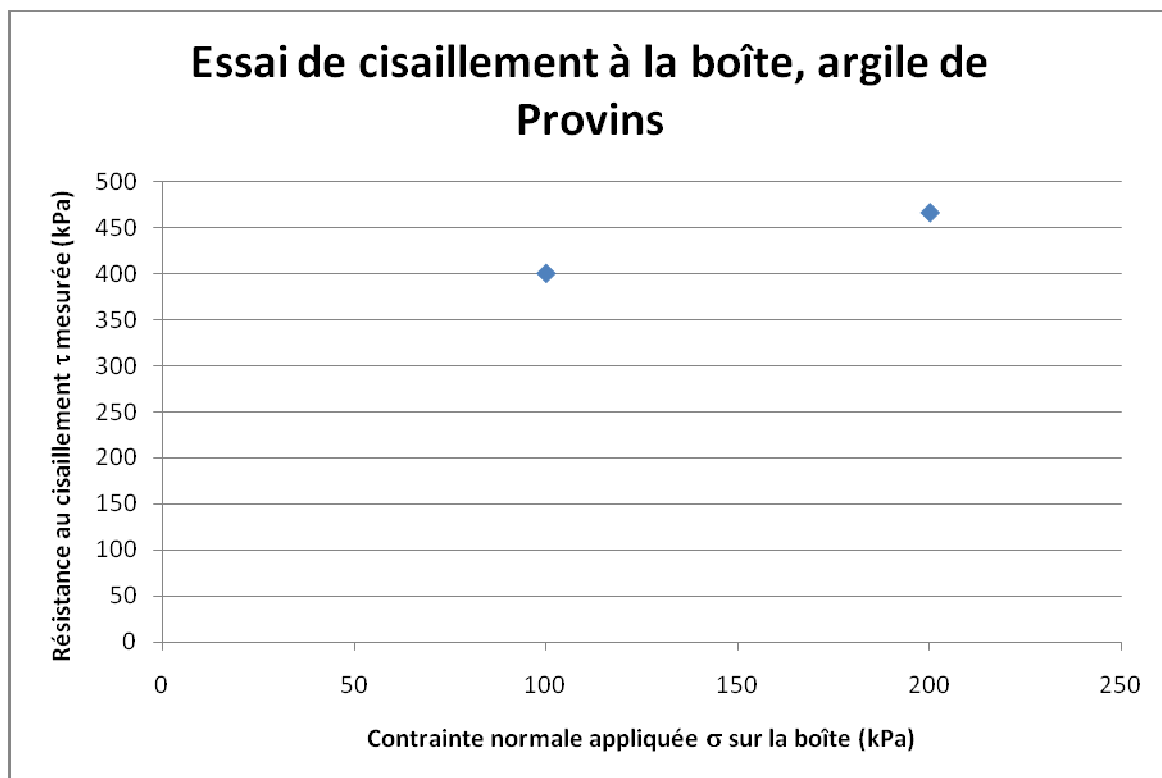
2.2.3. Les différents matériaux testés

Trois matériaux ont été testés :

- une roche tendre ;
- un sol cohérent ;
- un sol pulvérulent de type sable.

La roche tendre est le calcaire de Saint-Leu. Il a une résistance à la compression simple de 3,42 MPa. Les essais ont été réalisés sur des échantillons secs pour commencer, puis sur des échantillons ayant passé vingt-quatre heures dans l'eau pour observer s'il y a des différences.

Le sol cohérent est une argile de Provins. L'essai étant relativement rapide (une minute tout au plus), et l'utilisation de ces patins sur la machine étant lui aussi rapide (cycle mise en charge – déchargement de quelques minutes), le paramètre pertinent de cette argile est la cohésion non drainée c_u . Un essai de cisaillement non drainé a donc été réalisé au laboratoire du Centre de Géosciences à Marne-la-Vallée et a donné comme résultat le Graphique 2-2.

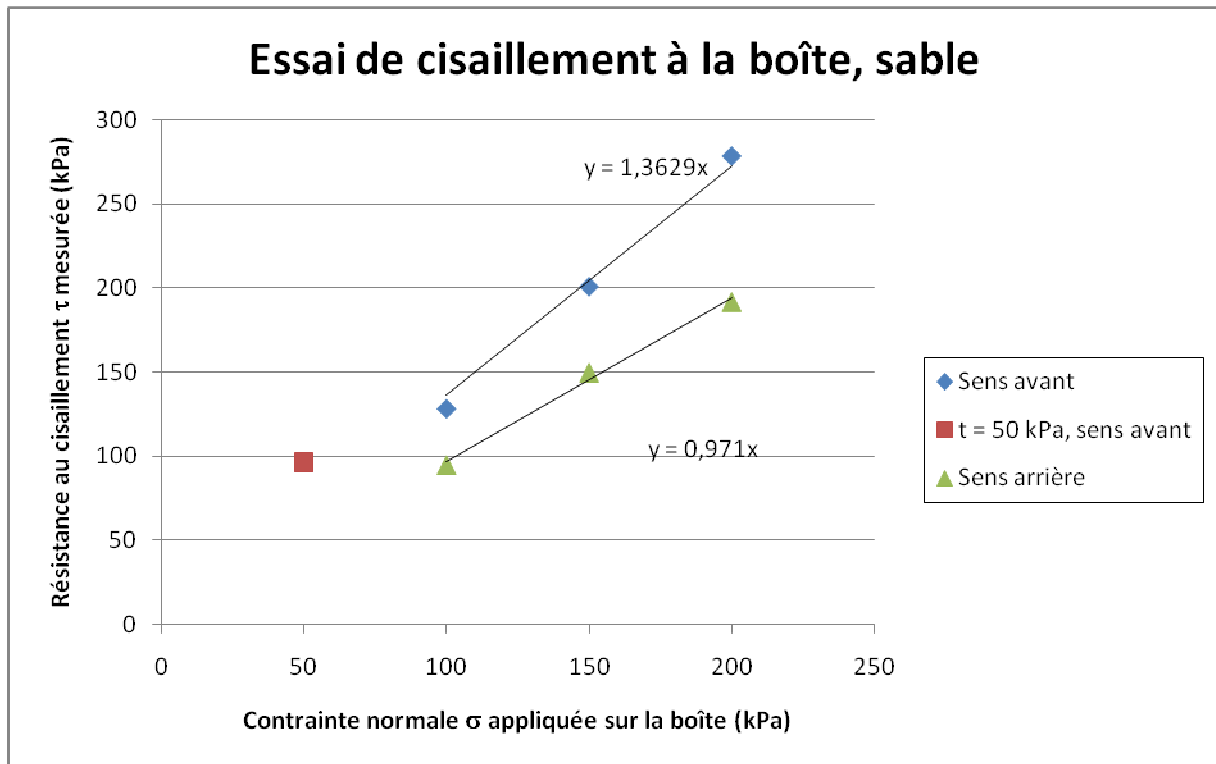


Graphique 2-2 : Résultats des essais de cisaillement à la boîte sur l'argile de Provins

En considérant une courbe $\sigma = f(\tau)$ de coefficient directeur nul (hypothèse de comportement non drainé), le Graphique 2-2 nous donne une cohésion (ordonnée à l'origine de la courbe moyenne) de 433 kPa. En observant les échantillons après les différents essais, on remarque que le cisaillement de l'éprouvette ne s'est pas fait sur toute la surface de l'éprouvette. Il a donc fallu évaluer la surface de cisaillement réelle et corriger les résultats : on obtient une cohésion de 1 Mpa, ce qui est très élevé pour une argile. Cette technique ne donne donc pas un résultat très fiable. On devra considérer une cohésion comprise entre 0,4 et 0,8 Mpa. De

même que pour le calcaire, des essais sur de l'argile non ré humidifiée ont d'abord été réalisés, puis des essais sur argile mouillée pour comparer les résultats.

Le sol pulvérulent est un sable non granulo-classé, type tout-venant avec des éléments ne dépassant pas 3mm. L'angle de frottement interne de ce sable a aussi été testé au Centre de Géosciences à Marne-la-Vallée, les résultats obtenus sont présentés sur le Graphique 2-3.



Graphique 2-3 : Résultats des essais de cisaillement à la boîte sur le sable (à densité et teneur en eau fixée)

On remarque sur le Graphique 2-3 une forte dispersion des résultats : d'une part, le sens de cisaillement de la boîte semble avoir une influence, ce qui est illogique, et ensuite le point avec une contrainte appliquée de 50 kPa ne permet pas d'approcher le nuage de point correctement par une droite. Ce point n'a donc pas été pris en compte. Les résultats obtenus (angle de frottement interne de 53° en sens avant et 44° en sens arrière) sont très peu plausibles par rapport à la consistance du sable utilisé.

En définitive, ces essais n'ont pas permis de déterminer correctement les caractéristiques des matériaux utilisés, les résultats obtenus ne seront donc que qualitatifs.

Ce sable a été utilisé avec deux jeux de caractéristiques différents présentés dans le Tableau 2-3.

	Teneur en eau naturelle w	Poids volumique apparent γ
(1)	2,8%	16 kN/m ³
(2)	7,8%	17 kN/m ³

Tableau 2-3 : Caractéristiques du sable testé

Le poids volumique désiré est obtenu en remplissant la boîte avec la masse voulue de sable, et en passant la boîte sous une presse pour compacter le sable au volume de la boîte.

2.3. Les résultats

L'intégralité des courbes obtenues lors des essais et des analyses de ceux-ci sont présentées dans les annexes :

- Annexe B : Essais réalisés sur le calcaire ;
- Annexe C : Essais réalisés sur l'argile ;
- Annexe D : Essais réalisés sur le sable lâche ;
- Annexe E : Essais réalisés sur le sable dense.

Cette partie présente les mécanismes à l'œuvre sur les différents matériaux, les types de courbes obtenues et les résultats sur le coefficient de frottement apparent.

2.3.1. Tests effectués sur le calcaire

La Figure 2-9 montre les différentes phases d'un essai sur du calcaire sec.

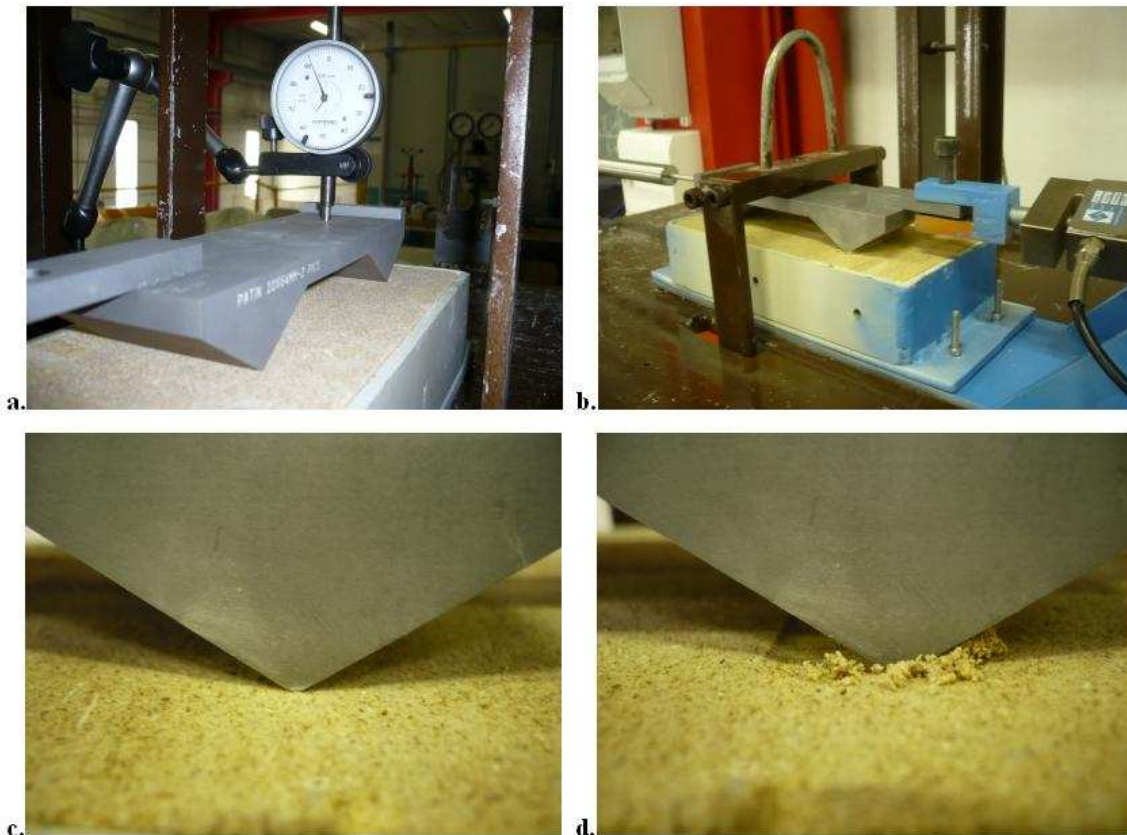


Figure 2-9 : Essai sur du calcaire de Saint-Leu (a. avant mise en charge ; b. après l'essai ; c. détail sur l'enfoncement du pic après mise en charge ; d. détail sur l'endommagement du calcaire après essai)

La Figure 2-9 (b. et c.) montre que le patin ne s'enfonce que très peu dans le calcaire : à charge normale maximale, l'enfoncement est inférieur à un demi millimètre (voir Graphique 2-4). Lors du glissement, il se crée un petit copeau à l'avant des pics du patin qui résulte de la destruction du calcaire sur une faible profondeur. La Figure 2-10 montre le profil de l'enfoncement du patin en fonction de son déplacement.

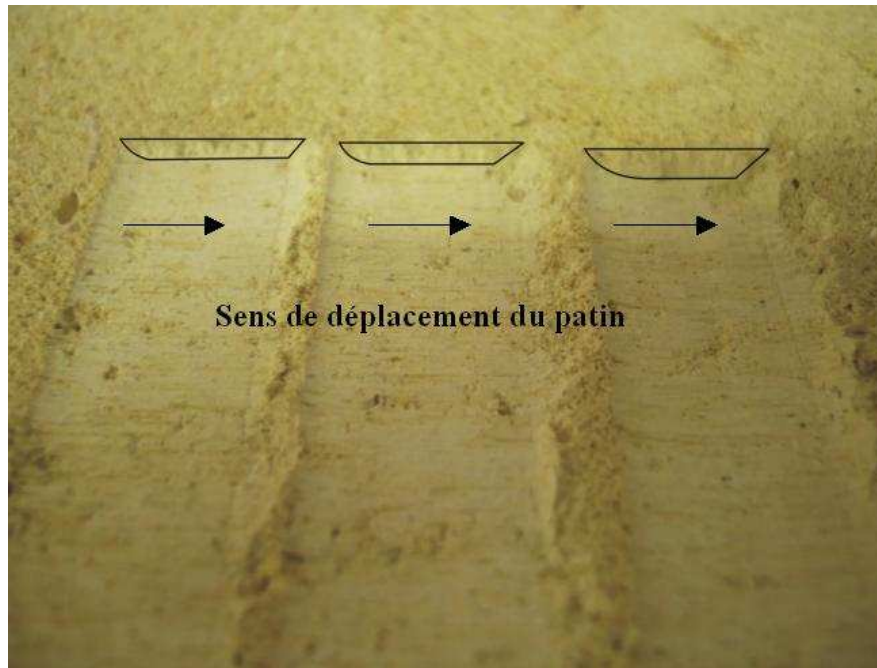
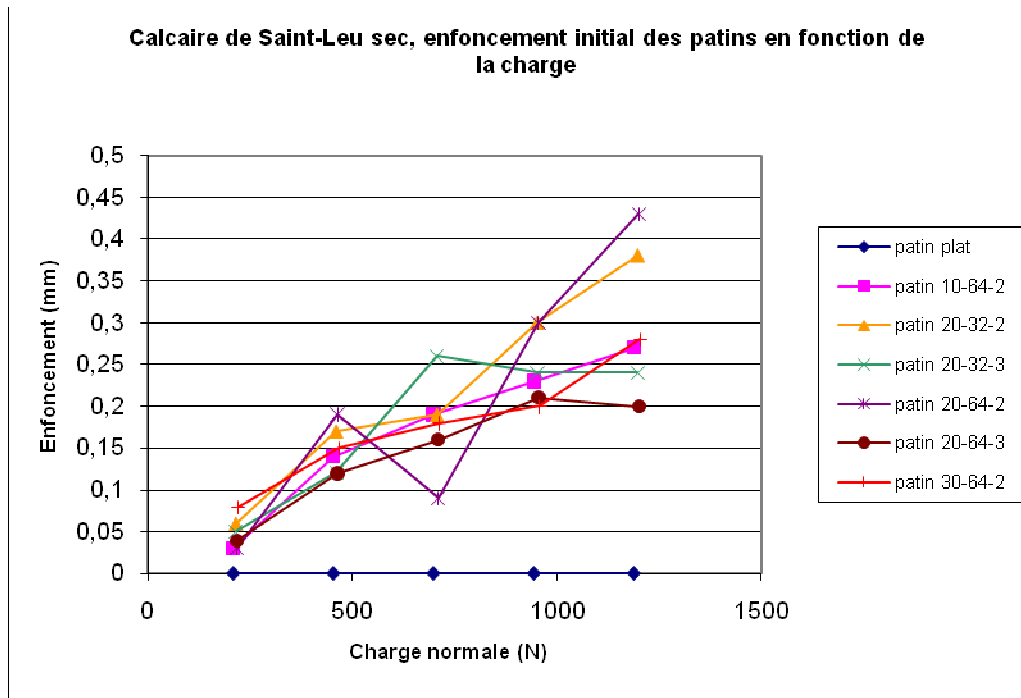


Figure 2-10 : Trois profils d'enfoncement du patin en fonction du déplacement

Cette figure représente trois essais successifs (de gauche à droite) avec le même patin et des charges normales croissantes. Le patin est déplacé sur 10 mm environ. Lors des premiers coups de pompes, le patin avance tout en s'enfonçant en même temps, ce qui crée le profil courbé à gauche sur la Figure 2-10. Puis le patin ne s'enfonce plus et se déplace toujours : entre environ 3 et 8mm, la profondeur reste constante. Plus la charge est élevée, on voit à droite de chaque profil en triangle qui n'est autre que l'empreinte du pic.

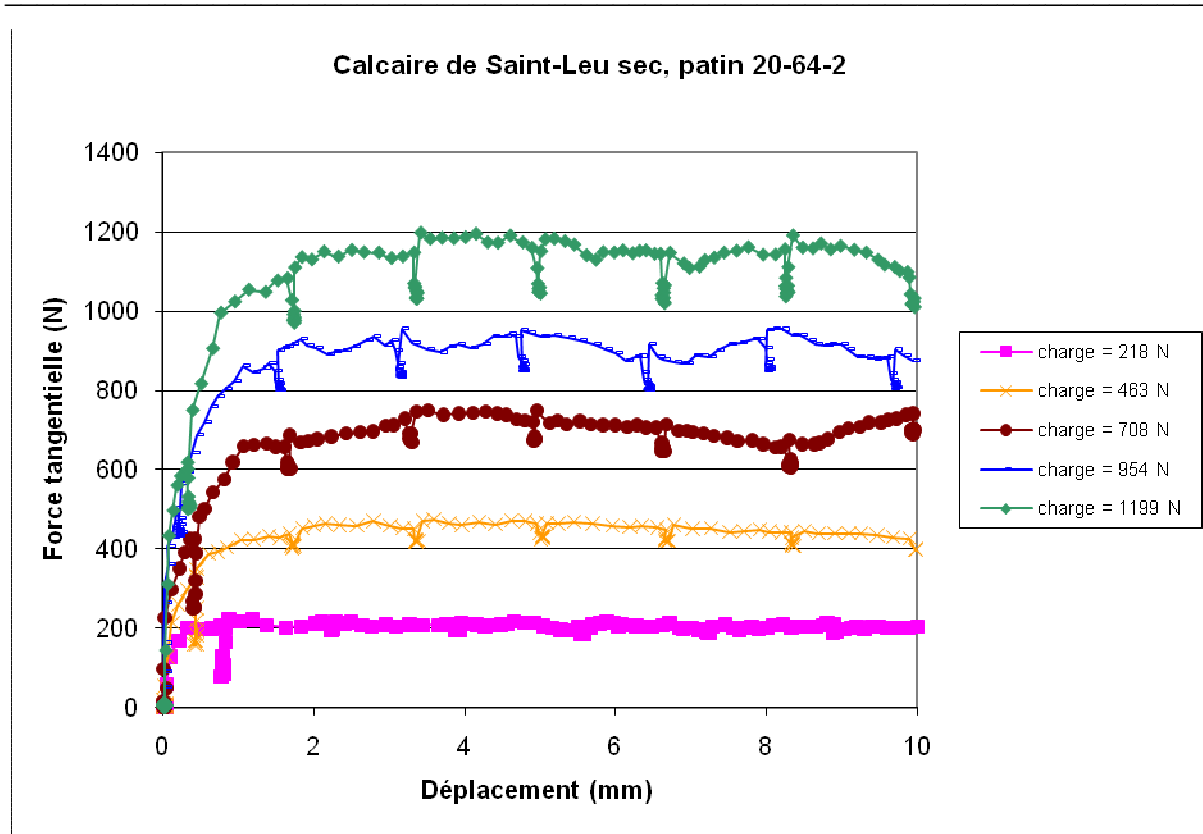
Le Graphique 2-4 montre les valeurs de l'enfoncement initial des différents patins juste après la mise en charge.



Graphique 2-4 : Enfoncement initial des patins dans du calcaire de Saint-Leu en fonction de la charge normale

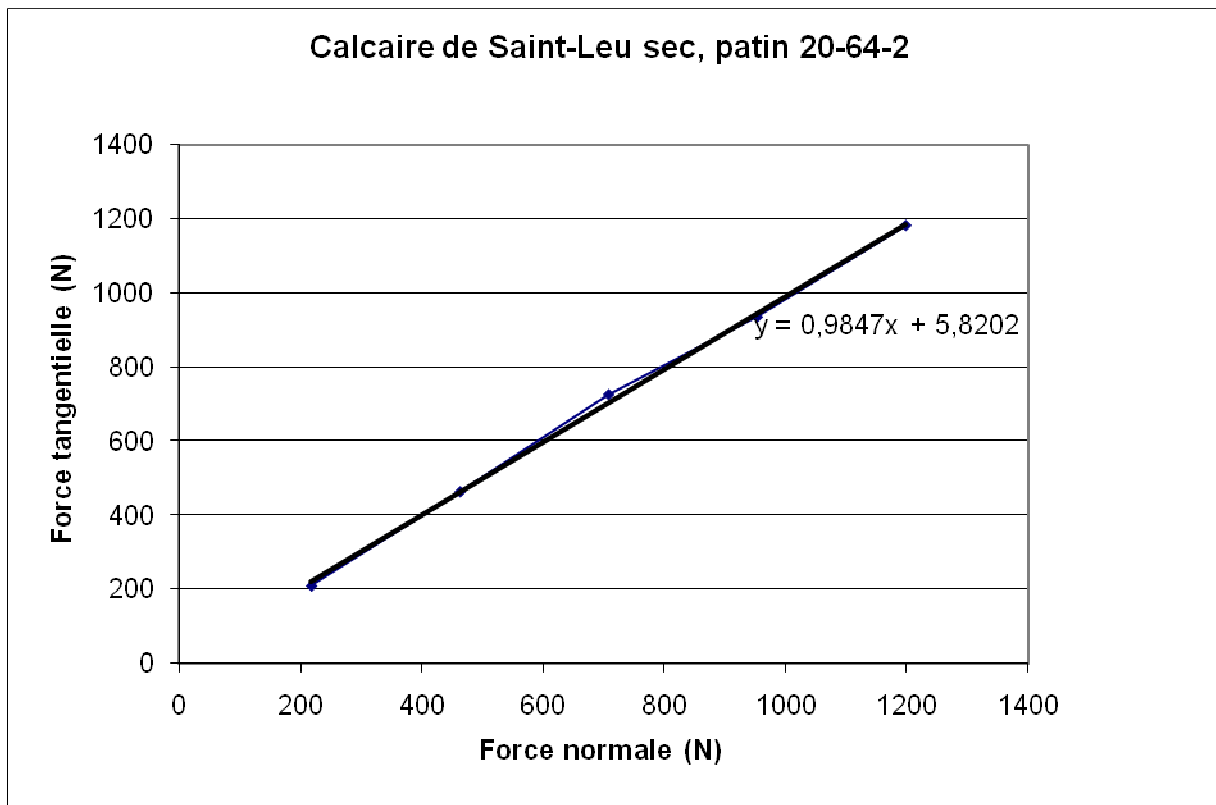
L'enfoncement initial est d'autant plus grand que la charge normale est élevée, ce qui est logique. On ne remarque pas de différences notables entre les différents patins, les valeurs de l'enfoncement étant trop faibles. On voit bien ici que dans le cas du calcaire on n'a pas vraiment de phénomène de frottement simple mais plutôt un cisaillement de la roche par le patin.

Le mécanisme de déplacement expliqué sur la Figure 2-10 se retrouve dans les courbes obtenues (voir Graphique 2-5).



Graphique 2-5 : Résultats des essais du patin 20-64-2 sur du calcaire de Saint-Leu avec différentes charges normales

Pour une charge normale donnée, la courbe $F_t = f(d)$ est tout d'abord fortement croissante puis relativement stable. La partie croissante correspond à l'enfoncement du patin dans le calcaire. Puis, dès que la valeur « palier » de F_t est atteinte, le patin ne s'enfonce plus et se déplace à la même profondeur. On a atteint la force tangentielle à partir de laquelle le patin ne tient plus et glisse. Pour le calcul du coefficient apparent de frottement, la force tangentielle correspondant à la charge normale appliquée est la valeur « palier » atteinte après la partie croissante de la courbe, ce qui donne comme résultat pour le patin 20-64-2 le Graphique 2-6.

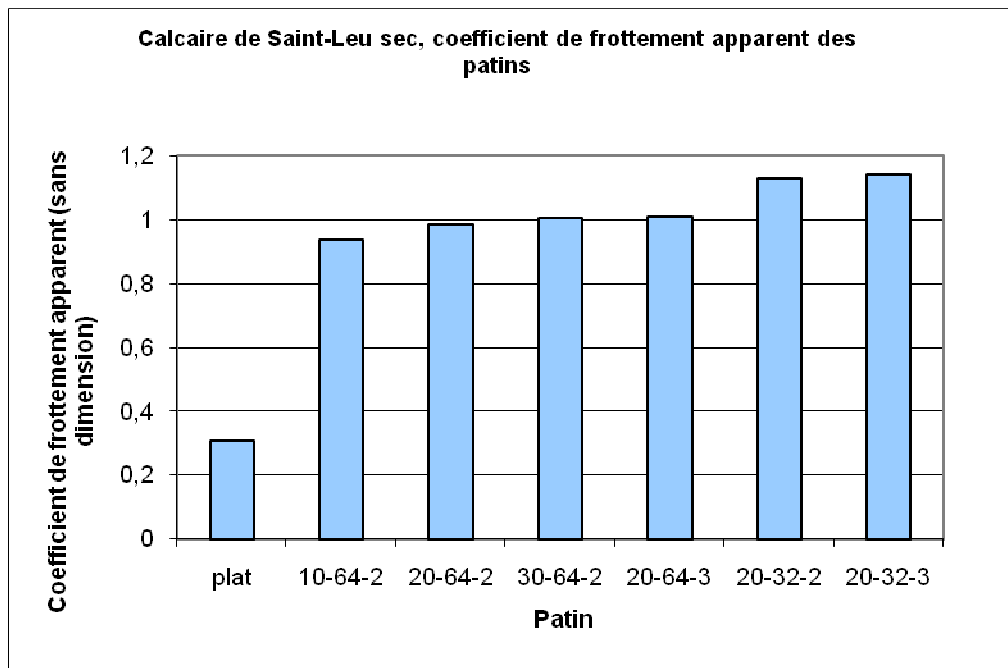


Graphique 2-6 : Courbe $F_t = f(F_n)$ pour le patin 20-64-2 sur le calcaire sec

On remarque que même si le mécanisme à l'œuvre n'est pas du tout du frottement simple, on obtient une série de points qui s'approche très bien par une droite. Les coefficients de frottement apparents des différents patins sont présentés dans le Tableau 2-4 et classés dans le Graphique 2-7.

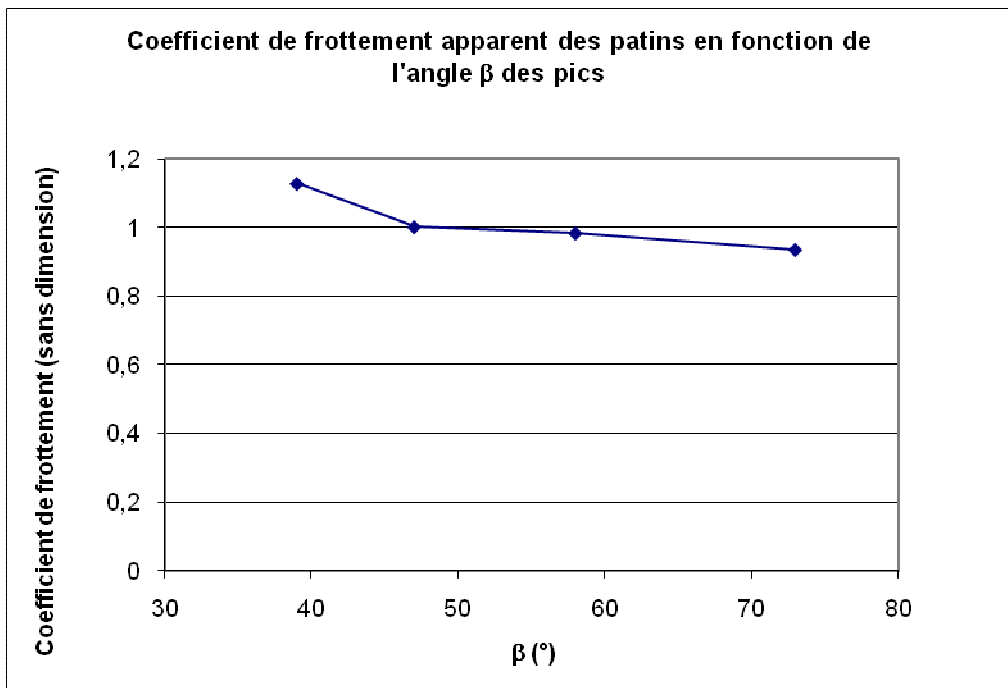
Patin	Coefficient de frottement apparent
10-64-2	0,94
20-32-2	1,13
20-32-3	1,14
20-64-2	0,98
20-64-3	1,01
30-64-2	1,00
plat	0,31

Tableau 2-4 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le calcaire sec



Graphique 2-7 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le calcaire sec

On remarque tout d'abord que les patins profilés ont un net avantage sur le patin plat (coefficient multiplié par trois). Ensuite, au sein des patins profilés, tous les coefficients tournent autour de 1, ce qui est très supérieur au coefficient 0,25 pris en compte pour le design du prototype du projet SCOUT. Etant donné l'enfoncement très faible des patins dans le calcaire, le paramètre « profondeur des pics » n'intervient pas ici. On remarque notamment des écarts entre les patins de profondeur 10, 20 et 30mm, ce qui nous amène à penser que le paramètre influent est l'angle d'attaque β des pics. Le Graphique 2-8 présente la variation du coefficient en fonction de β .



Graphique 2-8 : Variation du coefficient de frottement sur le calcaire en fonction de l'angle d'attaque des pics

On remarque bien une décroissance du coefficient en fonction de β .

Le paramètre « nombre de pics du patin » est bien moins influent : les valeurs du coefficient des patins 20-64-2 et 20-64-3 d'une part, et 20-32-2 et 20-32-3 d'autre part sont très proches (ces couples de patins ne diffèrent que par leur nombre de pics). Il y a deux hypothèses pour expliquer ce résultat :

- lors de l'essai, l'axe qui tire sur le patin n'est pas exactement en face de celui-ci et peut le faire basculer vers l'avant ; un patin à trois pics n'aura donc plus que deux pics vraiment en contact avec le matériau, le troisième le poinçonnant bien moins ;
- à charge normale constante, un patin à trois pics s'enfonce moins qu'un patin à deux pics, et donc mobilise moins de cisaillement par pics. Etant donné qu'il a plus de pics, il a tout de même un « front de cisaillement » de plus. Si l'enfoncement est linéaire avec la charge normale et le cisaillement linéaire avec l'enfoncement, il n'y aura pas de différence de coefficient entre les patins à deux et trois pics.

Le dernier paramètre à tester est l'influence de l'eau. Pour deux patins (20-64-2 et 20-32-2), les essais ont été fait avec un bloc de calcaire sec et un bloc ayant passé vingt-quatre heures dans l'eau. Les résultats sont données dans Tableau 2-5.

	Coefficient de frottement apparent pour le patin	
	20-64-2	20-32-2
Calcaire sec	0,98	1,13
Calcaire mouillé	1,02	1,24

Tableau 2-5 : Comparaison des coefficients de frottement apparent sur le calcaire sec et mouillé

Les résultats sont équivalents pour le calcaire sec et le calcaire mouillé. Les pics poinçonnent sans problème la première couche de calcaire humide pour aller s'ancrer dans le calcaire sec en dessous et mobiliser les mêmes efforts de cisaillement.

2.3.2. Tests effectués sur l'argile

La Figure 2-11 montre les différentes phases d'un essai sur de l'argile.

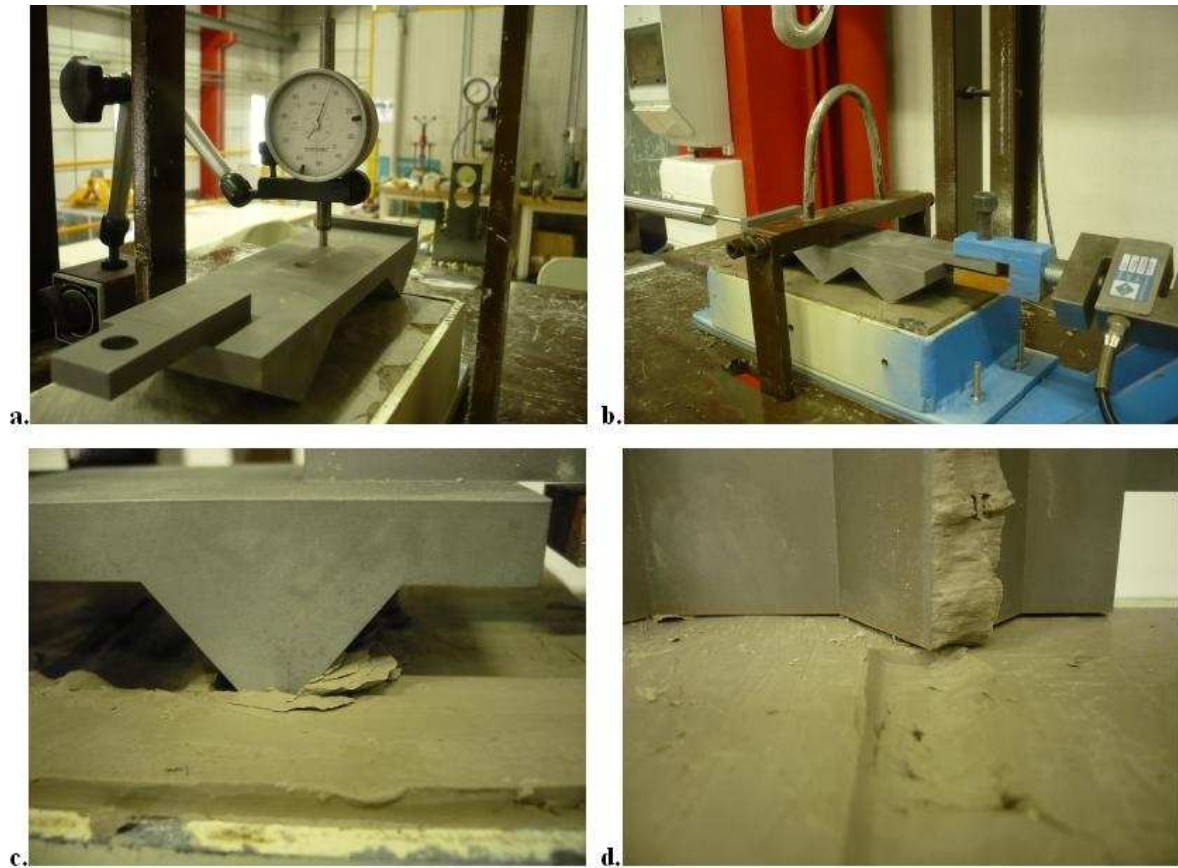


Figure 2-11 : Essai sur de l'argile de Provins (a. avant mise en charge ; b. après l'essai ; c. détail sur l'enfoncement du pic après l'essai ; d. détail sur l'endommagement de l'argile après essai)

La Figure 2-11 (b. et c.) montre que le patin s'enfonce plus que dans le calcaire, mais jamais complètement : à charge normale maximale, l'enfoncement atteint au maximum quelques millimètres (voir Graphique 2-9). Lors du glissement, il se crée une déformation plastique à l'avant des pics du patin qui engendre un copeau qui glisse sur une surface de cisaillement. La Figure 2-12 montre le profil de l'enfoncement du patin en fonction de son déplacement.

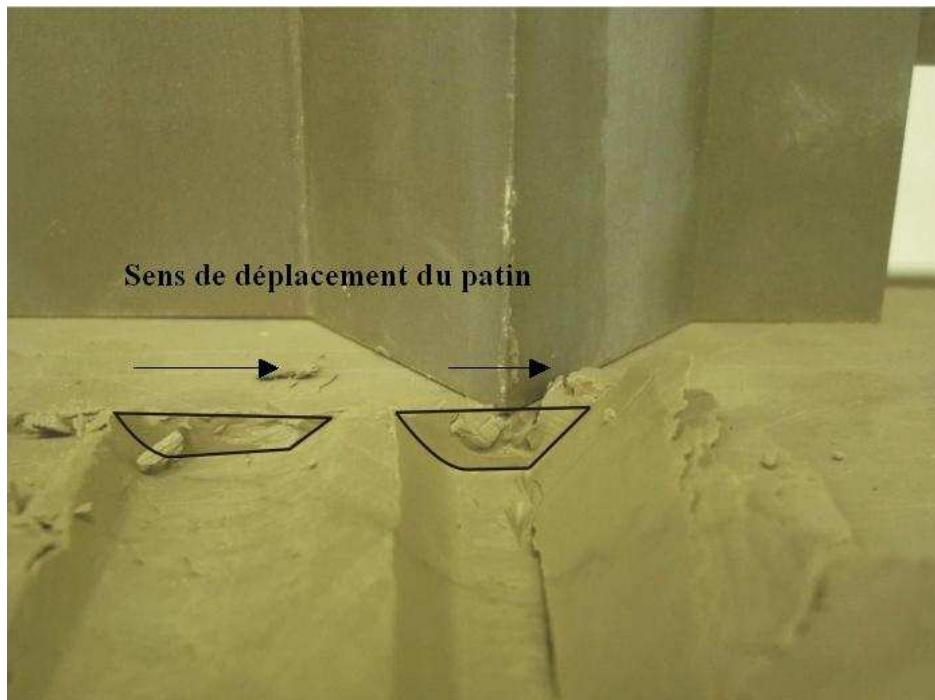
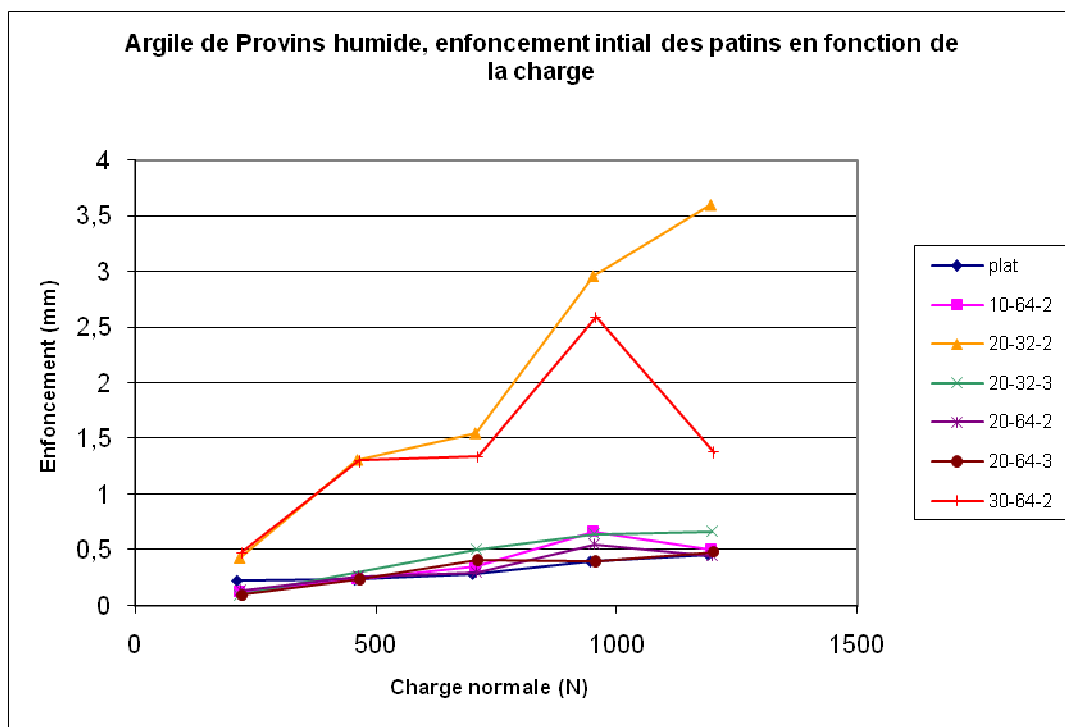


Figure 2-12 : Deux profils d'enfoncement du patin en fonction du déplacement

La Figure 2-12 représente deux essais successifs (de gauche à droite) avec le même patin et des charges normales croissantes. Le patin est déplacé sur 10mm environ. On retrouve les mêmes profils que sur la Figure 2-10 : courbé à gauche lorsque le patin commence à s'enfoncer, puis relativement plat quand le patin se déplace sans s'enfoncer, et enfin l'empreinte du patin. Le copeau est toujours visible sur la droite de la Figure 2-12.

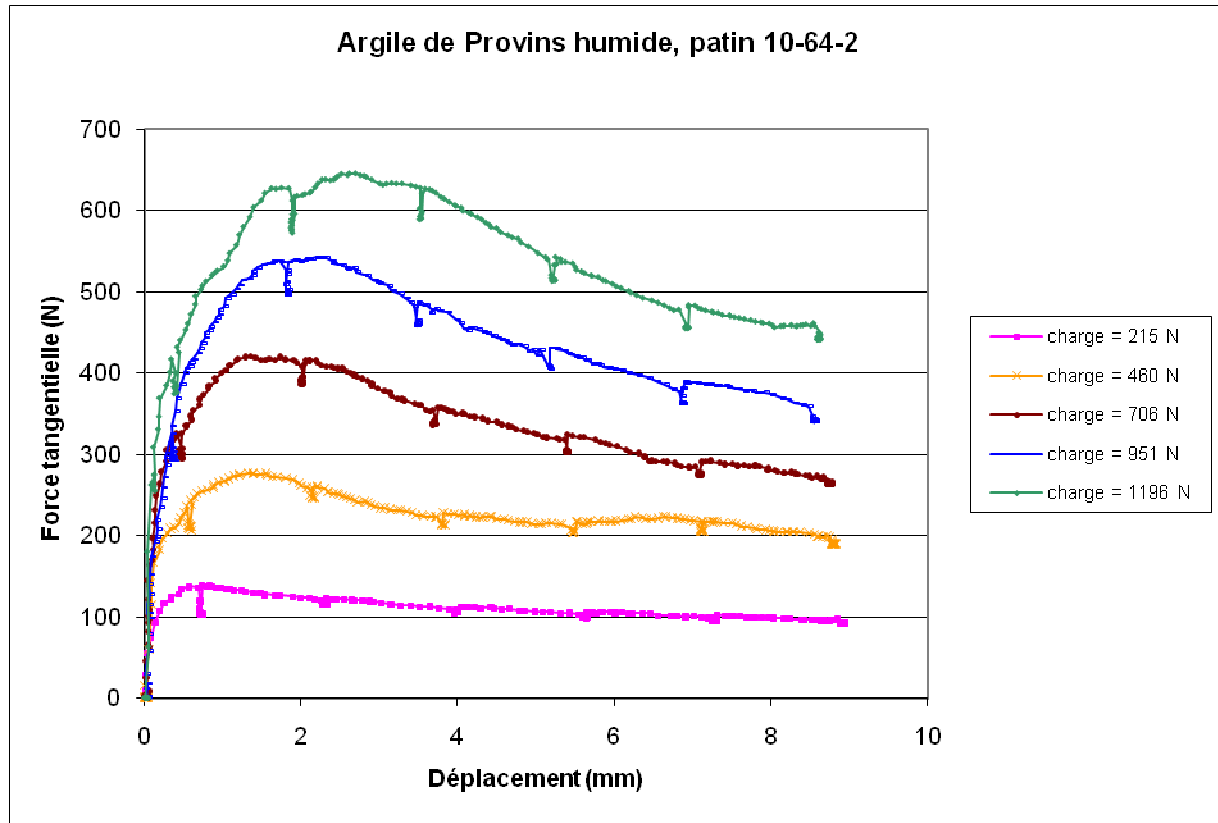
Le Graphique 2-9 montre les valeurs de l'enfoncement initial des différents patins juste après la mise en charge.



Graphique 2-9 : Enfoncement initial des patins dans l'argile de Provins en fonction de la charge normale

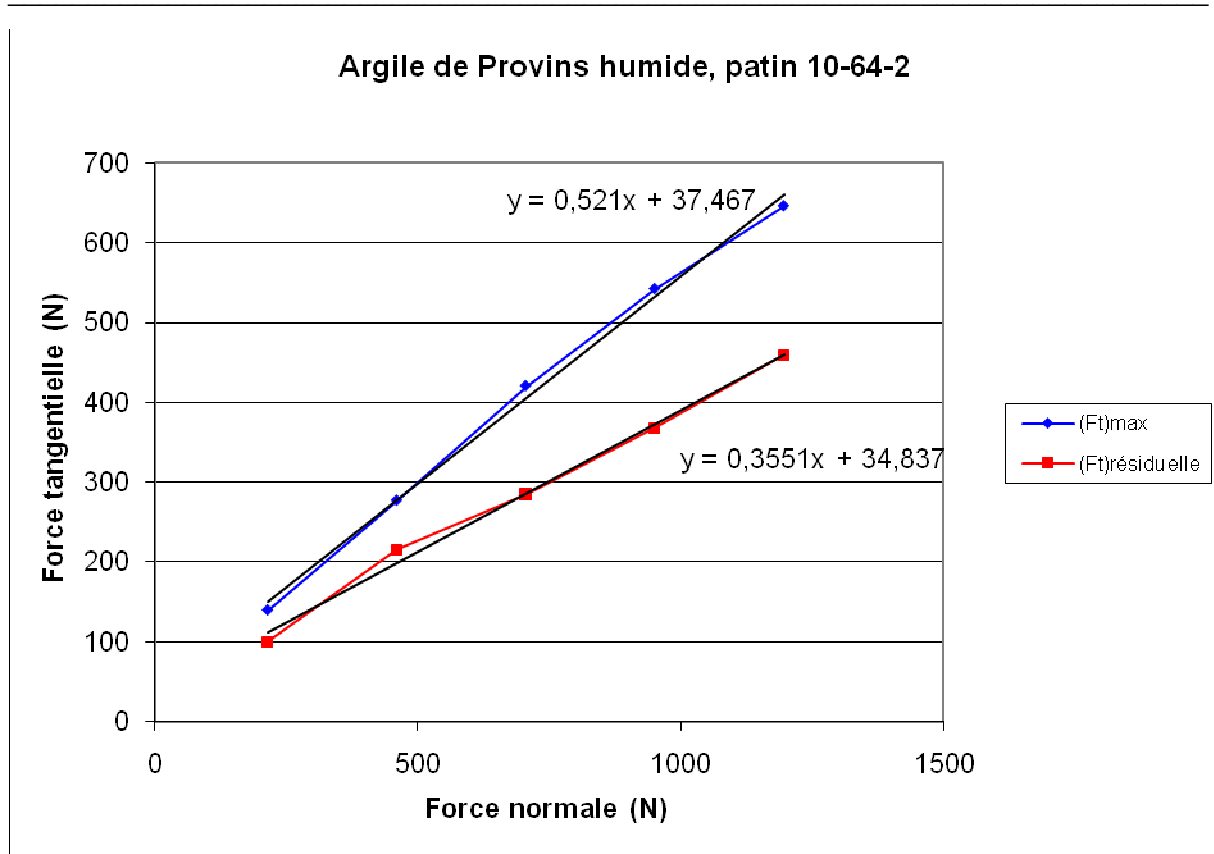
De nouveau l'enfoncement initial est d'autant plus grand que la charge normale est élevée. Deux patins semblent sortir du lot, mais les variations des caractéristiques de l'argile en fonction du taux d'humidité et l'hétérogénéité de ce matériau (présence de fissures) mettent en doute ce résultat... Comme dans le cas du calcaire, on n'a pas vraiment de phénomène de frottement simple mais plutôt un cisaillement de la roche par le patin. Cependant par rapport au calcaire, le patin s'enfonce plus dans l'argile lors de l'essai.

Une courbe typique obtenue lors d'une série d'essais est présentée sur le Graphique 2-10.



Graphique 2-10 : Résultats des essais du patin 20-64-2 sur du calcaire de Saint-Leu avec différentes charges normales

On a ici des courbes typique de cisaillement, avec un maximum qui correspond à l'état de rupture puis une décroissance vers une valeur limite que l'on appellera un état de résistance résiduelle. Pour chaque charge normale on définit deux forces tangentielles correspondantes : $(F_t)_{\max}$ et $(F_t)_{\text{résiduelle}}$ pour comparer la valeur des deux coefficients de frottement apparents. Pour le patin 10-64-2, le résultat est donné sur le Graphique 2-11.

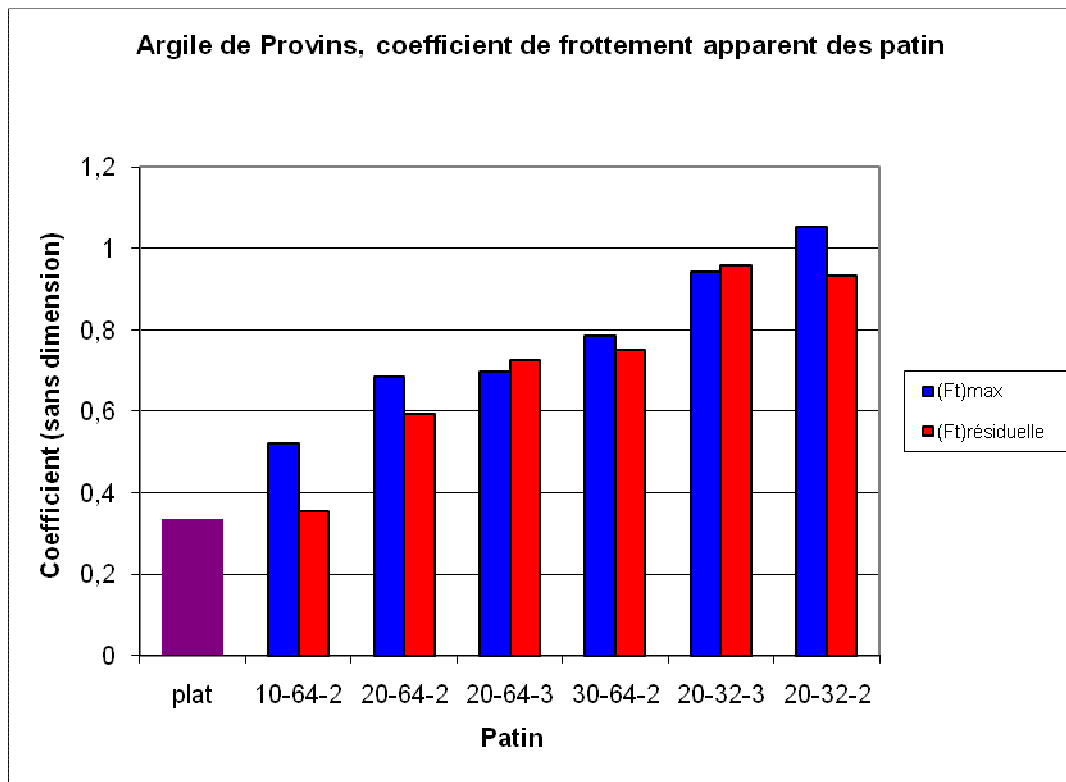


Graphique 2-11 : Courbes $F_t = f(F_n)$ pour le patin 10-64-2 sur l'argile

De nouveau, on remarque que même si le mécanisme à l'œuvre n'est pas du tout du frottement simple, on obtient des séries de points qui s'approximent très bien par des droites. Les coefficients de frottement apparents des différents patins sont présentés dans le Tableau 2-6 et classés dans le Graphique 2-12 par ordre de croissant de coefficient suivant $(F_t)_{\max}$.

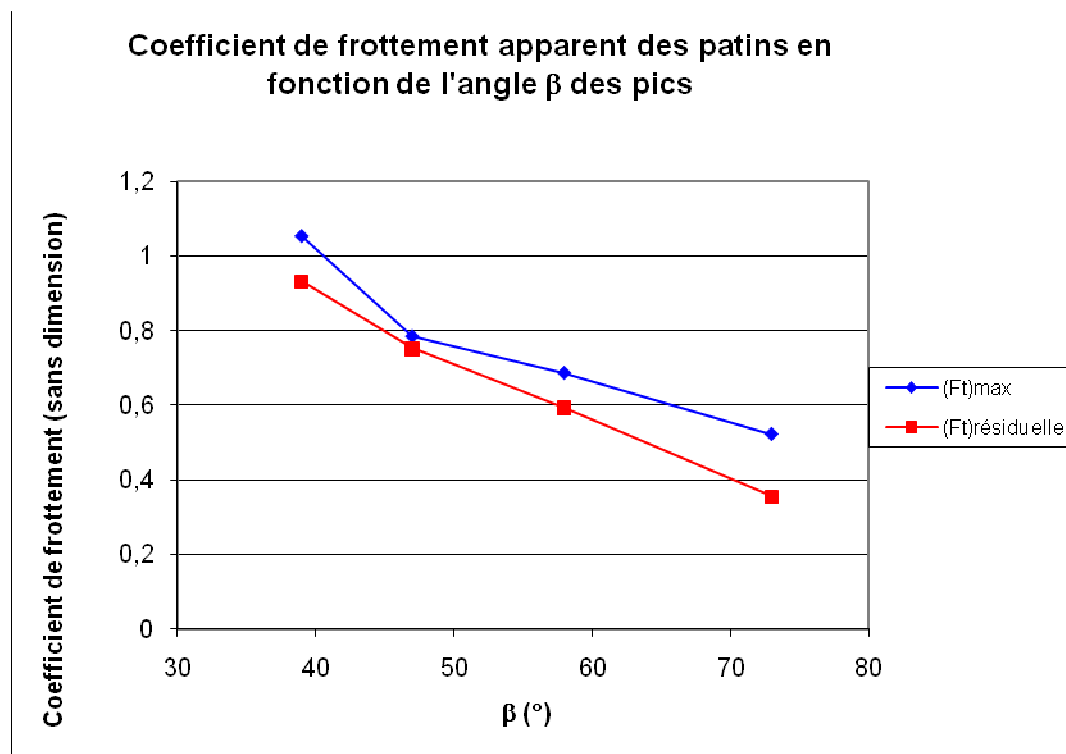
Patin	Coefficient de frottement apparent (avec $(F_t)_{\max}$)	Coefficient de frottement apparent (avec $(F_t)_{\text{résiduelle}}$)
10-64-2	0,52	0,36
20-32-2	1,05	0,93
20-32-3	0,94	0,96
20-64-2	0,69	0,59
20-64-3	0,70	0,73
30-64-2	0,78	0,75
plat	0,33	0,33

Tableau 2-6 : Coefficients de frottement apparents des patins sur l'argile humide



Graphique 2-12 : Coefficients de frottement apparents des patins sur l'argile humide

On remarque de nouveau que les patins profilés ont un coefficient de frottement apparent bien supérieur au patin plat. On a aussi le même classement en fonction de l'angle d'attaque des pics (voir le Graphique 2-13).



Graphique 2-13 : Variation du coefficient de frottement sur l'argile en fonction de l'angle d'attaque des pics

Plus β est petit, c'est-à-dire plus l'angle d'attaque des pics est acéré, plus le coefficient de frottement apparent du patin est élevé.

Concernant le nombre de pics, on observe le même problème de basculement qu'avec le calcaire. On n'observe de nouveau pas de différence notable entre les patins à deux ou trois pics.

Les coefficients calculés avec $(F_t)_{\max}$ et ceux calculés avec $(F_t)_{\text{résiduelle}}$ sont proches, parfois supérieurs, parfois inférieurs. La seule différence notable est pour le patin 10-64-2, où le coefficient calculé avec $(F_t)_{\text{résiduelle}}$ est 30% plus petit que celui calculé avec $(F_t)_{\max}$. Au vu de ces constatations on ne considérera par la suite plus que les coefficients calculés avec $(F_t)_{\max}$. En effet, il correspondent à la force tangentielle qu'ils ne faut pas dépasser pour que le patin ne glisse pas, c'est-à-dire ce qui nous intéresse pour le dimensionnement de la machine.

De la même manière que pour le calcaire, la présence d'eau sur le matériau a été testée : en reprenant une boîte d'argile humide, on a aspergé de l'eau au dessus jusqu'à détremper le matériau, et les tests avec les patins 20-64-2, 20-32-2 et le patin plat ont été refaits. Les résultats sont donnés dans le Tableau 2-7.

	Coefficient de frottement apparent pour le patin		
	20-64-2	20-32-2	plat
Argile humide	0,69	1,05	0,33
Argile détrempeée	0,70	1,03	0

Tableau 2-7 : Comparaison des coefficients de frottement apparents sur l'argile humide et l'argile détrempeée

Même si l'argile détrempeée est beaucoup plus endommagée par les essais, il n'y a aucune différence sur le coefficient de frottement apparent entre l'argile mouillée et l'argile détrempeée pour les patins profilés. En revanche l'avantage des patins profilés sur le patin plat se voit clairement : en effet, le patin plat n'a aucune adhérence sur l'argile mouillée et glisse sans effort.

2.3.3. Tests effectués sur le sable

La Figure 2-13 montre les différentes phases d'un essai sur du sable :

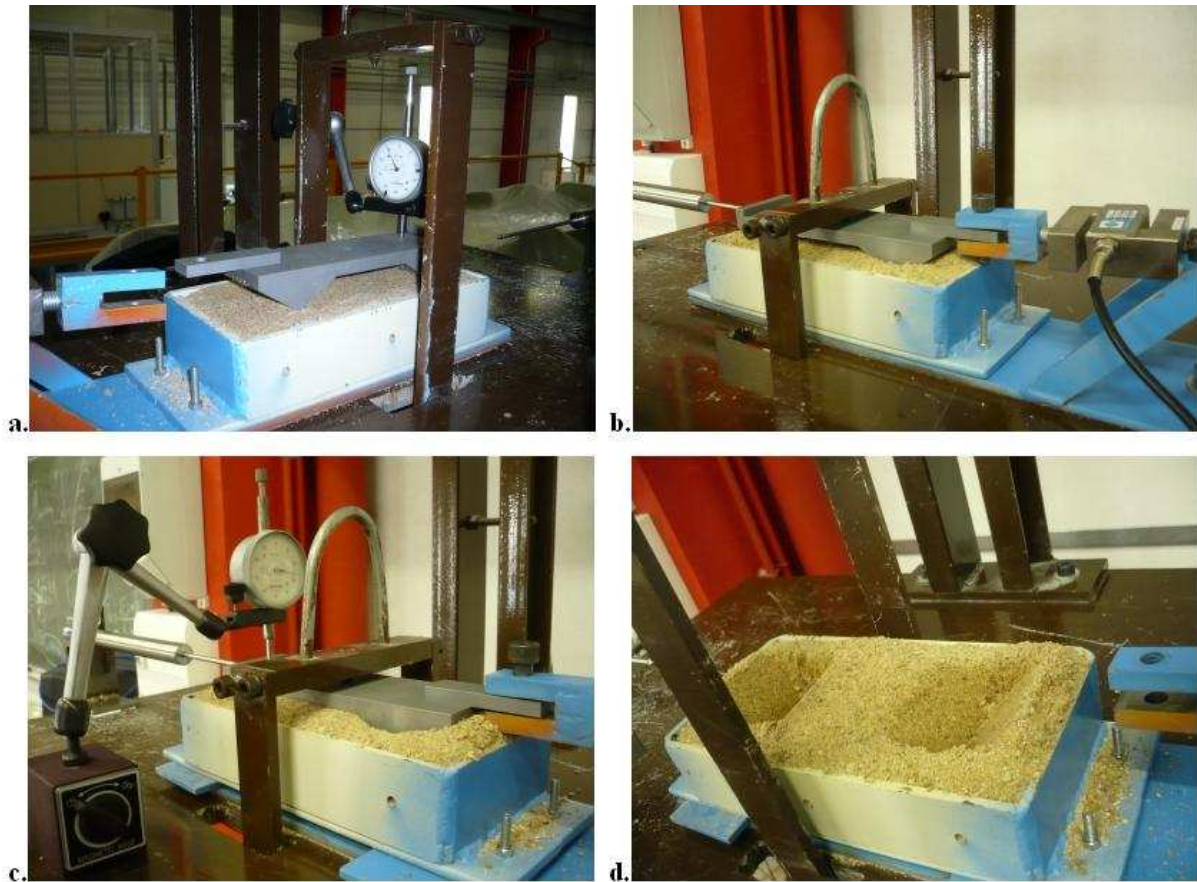
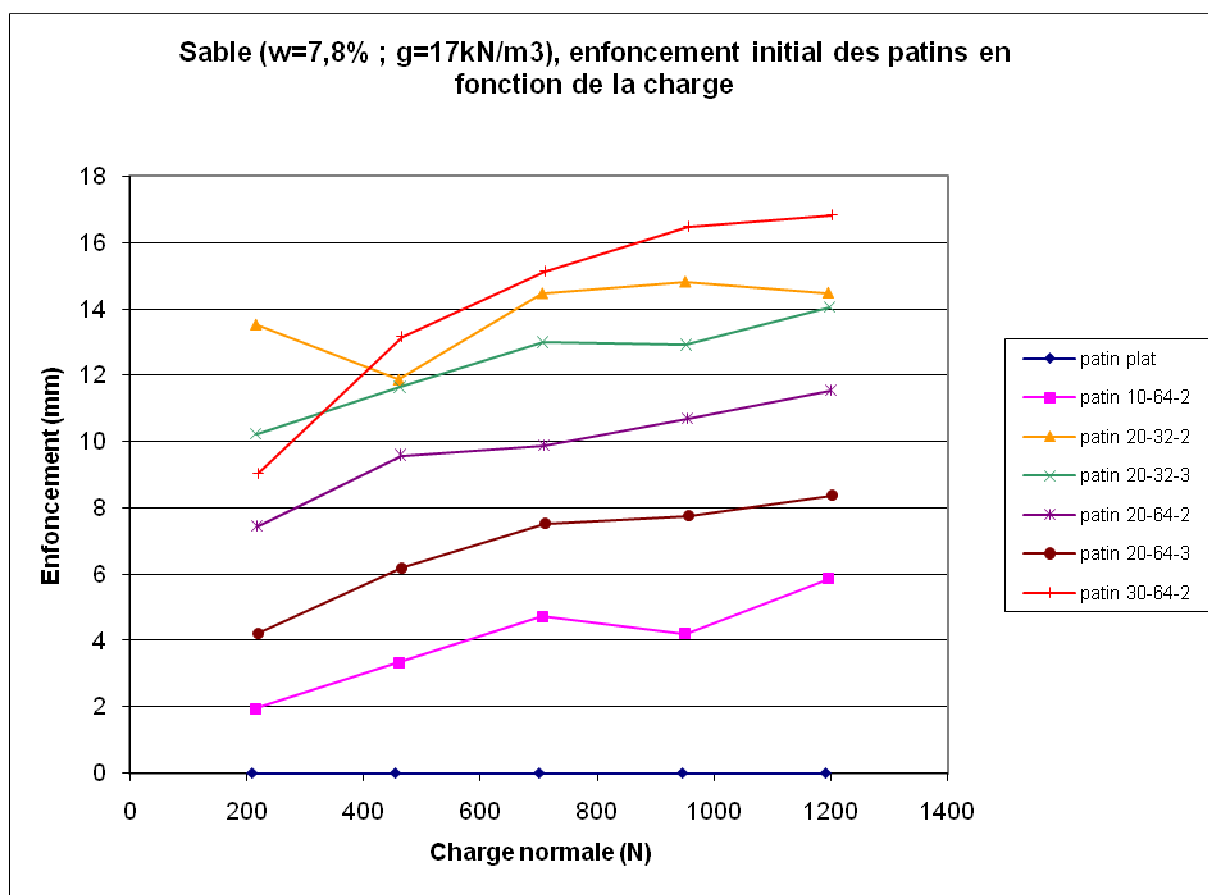


Figure 2-13 : Essai sur du sable (a. avant mise en charge ; b. après mise en charge ; c. après l'essai ; d. empreinte du patin dans la boîte)

On remarque un comportement du patin différent sur le sable que sur l'argile ou le calcaire : il s'enfonce complètement. Sur la Figure 2-13 a., le patin s'enfonce déjà notablement uniquement en le posant sur le sable, sous l'effet de son propre poids. Lors de la mise en charge (b.), du sable est déplacé au niveau des pics et comble l'espace entre les pics : la patin ne s'enfonce pas forcément de 20mm si la profondeur de ses pics est 20mm mais il s'enfonce d'un peu moins (voir Graphique 2-14). Lors du déplacement du patin, on remarque que le patin continue à s'enfoncer en poinçonnant le matériau. Lorsqu'on retire le patin après l'essai, une empreinte nette des pics est imprimée dans le sable.

Deux jeux de caractéristiques ont été utilisés pour le sable comme expliqué dans la partie 2.2.3 *Les différents matériaux testés.*

L'enfoncement des différents patins est plus pertinent dans le sable le plus dense ($w=7,8\%$; $\gamma=17\text{kN/m}^3$) car il présente plus de différences. Le Graphique 2-14 présente l'enfoncement des différents patins en fonction de la charge.



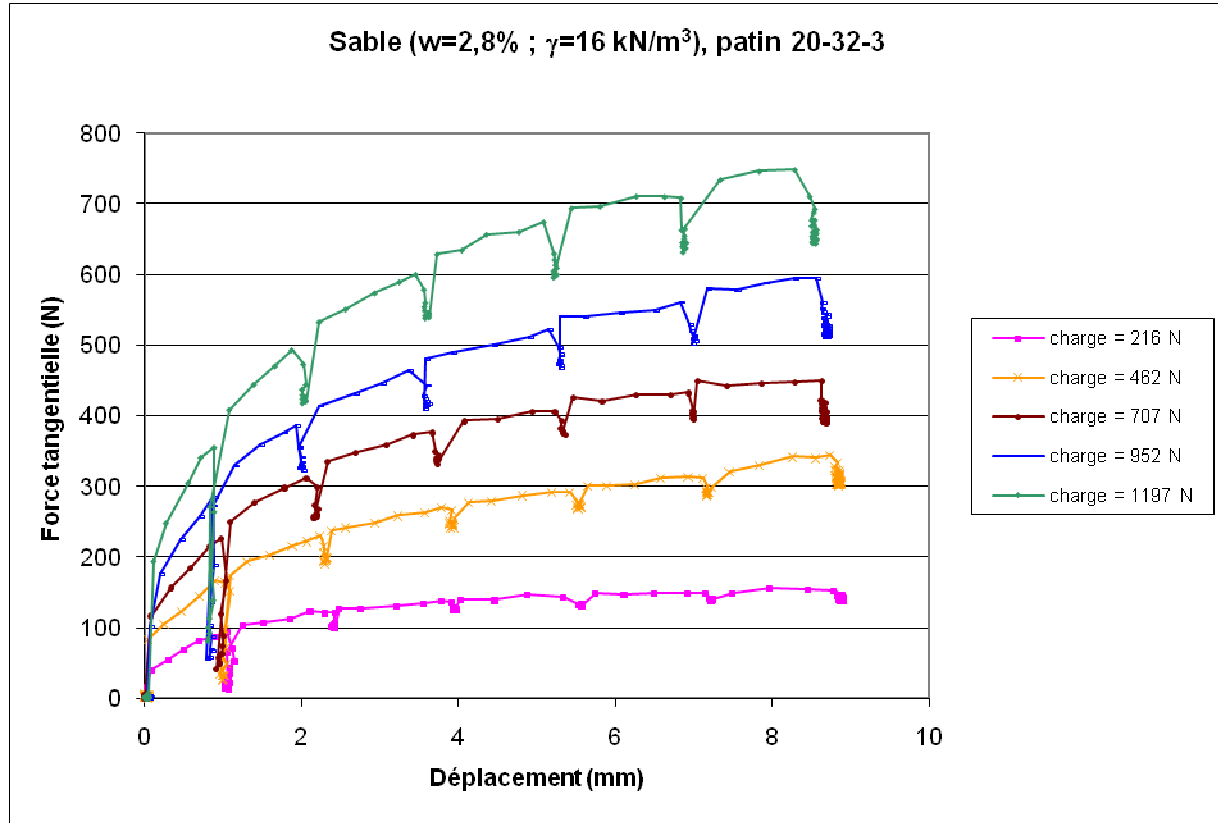
Graphique 2-14 : Enfoncement initial des patins dans le sable en fonction de la charge normale

L'influence des différents paramètres est claire :

- Concernant le paramètre « profondeur du patin », la logique est respectée : le patin avec des pics de 30 mm s'enfonce plus que celui avec les pics de 20 mm, qui lui-même s'enfonce plus que le patin aux pics de 10 mm.
- Concernant le nombre de pics, plus un patin a de pics moins il s'enfonce à charge normale égale. En effet, la charge se retrouve répartie sur plus de surface avec plus de pics. Sur le Graphique 2-14 le patin 20-64-3 s'enfonce moins que le 20-64-2, et le 20-32-3 s'enfonce moins que le 20-32-2. Le rapport moyen entre l'enfoncement du patin 20-64-3 et celui du patin 20-64-2 est de 0,68 (environ 2/3), ce qui tend à faire penser que l'enfoncement est linéaire en fonction du nombre de pics, c'est-à-dire que l'enfoncement d'un pic est linéaire en fonction de la charge appliquée. Le rapport moyen entre l'enfoncement du patin 20-32-3 et celui du patin 20-32-2 est quant à lui de 0,90, ce qui infirmerait l'hypothèse précédente. Ces essais ne permettent pas de trancher sur ce point.
- Concernant l'angle d'attaque β des pics, plus le pic est acéré (plus β est petit), plus le patin s'enfonce ; c'est ce que l'on remarque avec le patin 20-32-2 ($\beta=39^\circ$) qui s'enfonce plus que le 20-64-2 ($\beta=58^\circ$, autres paramètres identiques au patin 20-32-2), et avec le patin 20-32-3 ($\beta=39^\circ$, autres paramètres identiques au patin 20-32-3) qui s'enfonce plus que le 20-64-3 ($\beta=58^\circ$).

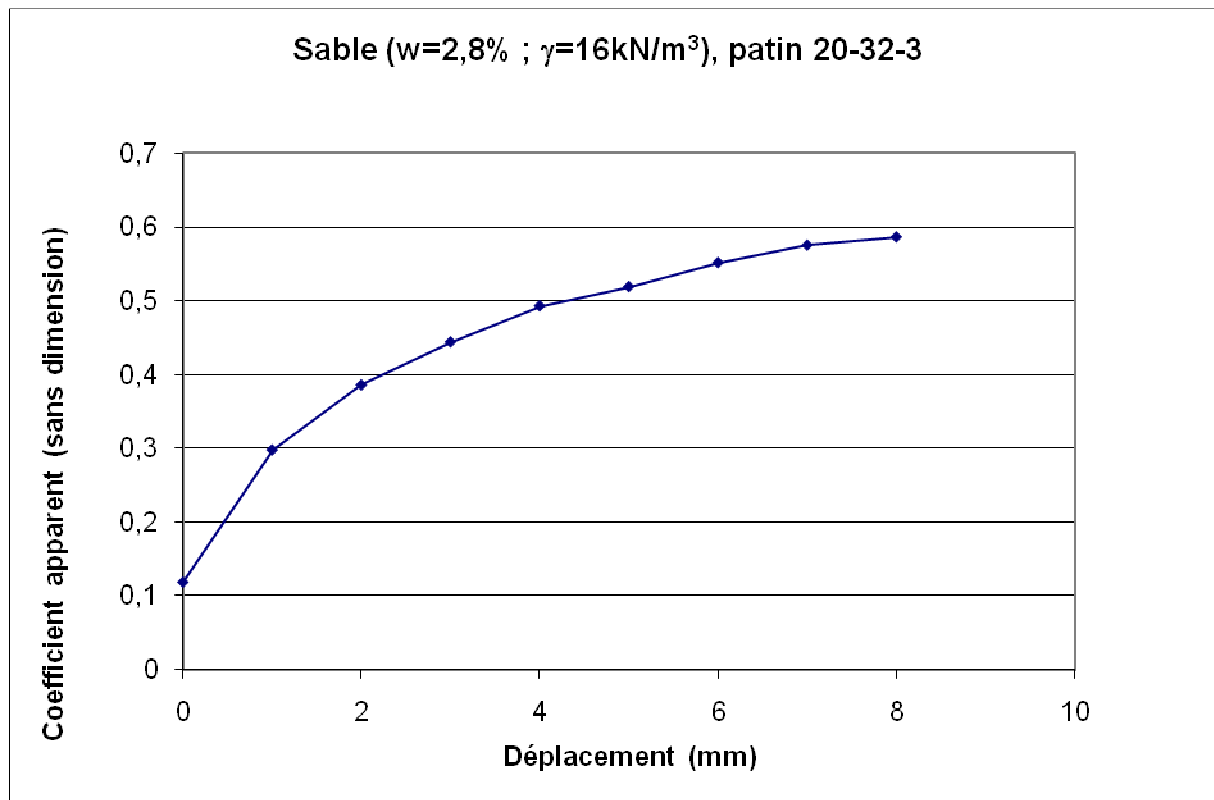
2.3.3.1. Sable lâche ($w=2,8\%$, $\gamma=16\text{kN/m}^3$)

Une courbe typique obtenue lors d'une série d'essais est présentée sur le Graphique 2-15.



Graphique 2-15 : Résultats des essais du patin 20-32-3 sur du sable lâche avec différentes charges normales

Les courbes du Graphique 2-15 sont pour la plupart croissantes et ne se stabilisent pas dans l'intervalle $[0,10\text{mm}]$ de déplacement. Ceci est dû au fait que les patins, lors de leur mouvement, continuent à s'enfoncer et consolident ainsi le matériau : la force tangentielle nécessaire pour continuer à bouger le patin est donc de plus en plus élevée. Pour calculer le coefficient apparent de frottement, on a donc noté pour chaque millimètre de déplacement la force tangentielle correspondante, et calculé le coefficient à un déplacement fixé. Le résultat pour ce patin 20-32-3 est présenté sur le Graphique 2-16. Ce calcul de coefficient en fonction du déplacement est justifié : à déplacement fixé, la courbe $F_t = f(F_n)$ s'approche très bien par une droite.



Graphique 2-16 : Coefficient de frottement apparent du patin 20-32-3 sur du sable lâche en fonction du déplacement du patin

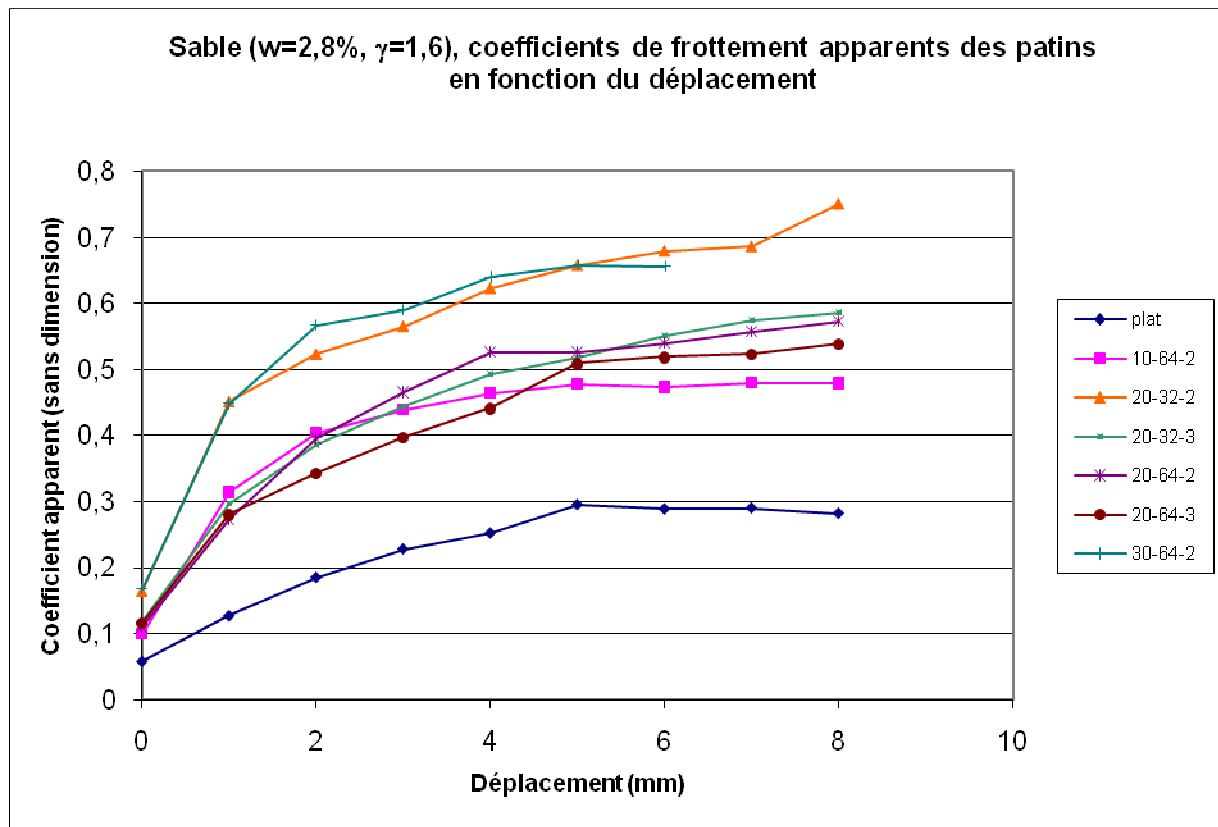
On voit sur le Graphique 2-16 que le coefficient augmente avec le déplacement. En fonction du déplacement admissible sur la machine, on pourra ainsi choisir le coefficient de frottement adapté pour le dimensionnement des patins.

Un déplacement de 5mm est tout à fait acceptable pour la machine, le Tableau 2-1 présente donc les coefficients de frottement apparents des différents patins à 5mm. Le

Graphique 2-17 donne quant à lui l'ensemble des coefficients des patins en fonction du déplacement.

Patin	Coefficient de frottement apparent à 5mm
10-64-2	0,48
20-32-2	0,66
20-32-3	0,52
20-64-2	0,53
20-64-3	0,51
30-64-2	0,66
plat	0,30

Tableau 2-8 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable lâche à 5mm de déplacement



Graphique 2-17 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable lâche en fonction du déplacement du patin

On remarque tout d'abord que le patin plat est de nouveau en-dessous de tous les autres. Ensuite, deux patins ont un coefficient de frottement notablement supérieur aux autres : 30-64-2 et 20-32-2. Le patin 30-64-2 s'enfonce d'au moins 10mm de plus que tous les autres, il est donc logique qu'il mobilise plus d'efforts tangentiels (on remarque aussi que le patin 10-64-2, avec les pics les moins profonds, a le coefficient le plus bas à partir de 5mm). Pour le patin 20-32-2 il n'y a pas de raison évidente à première vue... Son détachement du peloton des autres patins est relativement étonnant. On remarque tout de même que les deux patins avec les pics les plus acérés (20-32-2 et 20-32-3) ont les coefficients les plus élevés, ce qui confirme les résultats obtenus sur le calcaire et l'argile.

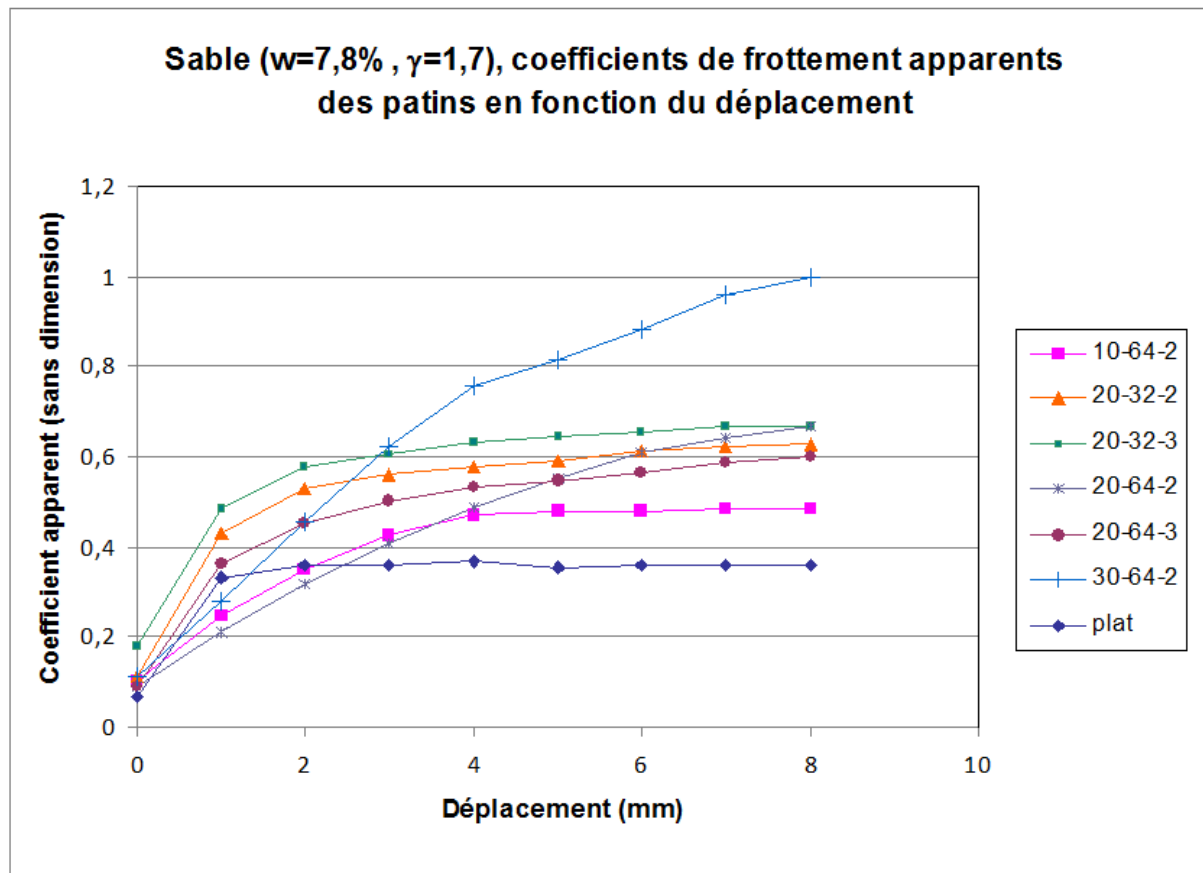
2.3.3.2. Sable dense ($w=7,8\%$; $\gamma=17\text{kN/m}^3$)

Les courbes obtenues sur le sable dense sont similaires à celles obtenues sur le sable lâche (voir Graphique 2-15), à ceci près que la plupart d'entre elles tendent à se stabiliser après 5 ou 6mm. En effet, ce sable est déjà compacté, le glissement du patin dessus ne le consolide que très peu.

Afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux du sable lâche, le même calcul de coefficient apparent en fonction du déplacement a été réalisé. Le Tableau 2-9 présente ces coefficients à 5mm, et le Graphique 2-18 donne l'ensemble des coefficients en fonction du déplacement.

Patin	Coefficient de frottement apparent à 5mm
10-64-2	0,48
20-32-2	0,59
20-32-3	0,65
20-64-2	0,55
20-64-3	0,55
30-64-2	0,81
plat	0,36

Tableau 2-9 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable dense à 5mm de déplacement



Graphique 2-18 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable dense en fonction du déplacement du patin

Les valeurs présentées pour le sable dense sont proches de celles du sable lâche. Le Graphique 2-18 montre que les coefficients se stabilisent après 4 ou 5mm, ce qui traduit bien le fait que les courbes des essais sur le sable dense tendent plus à se stabiliser que sur le sable lâche. La patin plat a toujours le coefficient le plus faible.

La profondeur des pics des patins a ici un effet direct : plus les pics sont profonds, plus le coefficient est élevé : le patin 30-64-2, qui pénètre le sable sur 30mm, est largement au-dessus des autres patins.

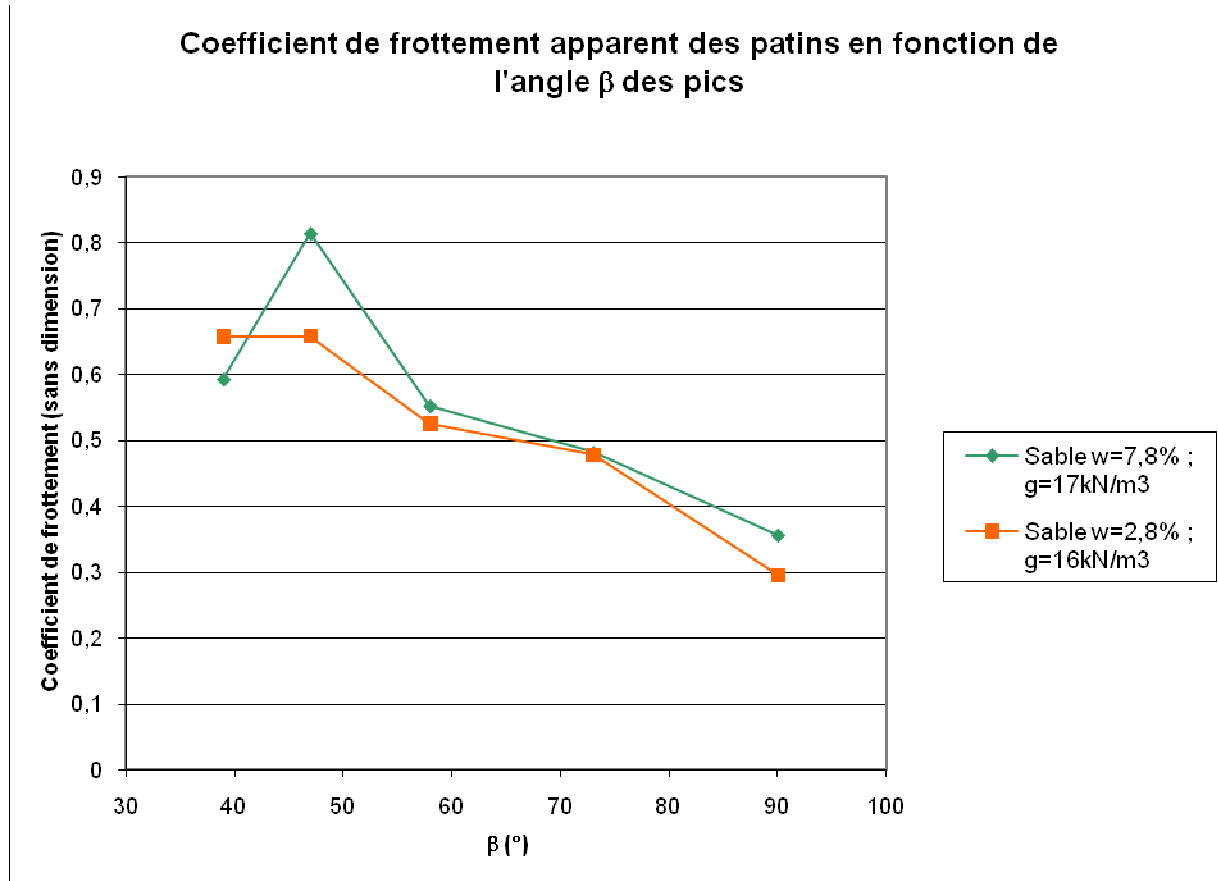
Le nombre de pics joue moins sur les résultats que la profondeur des pics : le coefficient des patins à deux pics et de ceux à trois pics correspondant sont éloignés de 0,05 au plus.

L'angle d'attaque des pics semble de nouveau jouer sur le coefficient : plus β est petit, plus le coefficient est élevé (voir 2.3.4)

Conclusion sur le sable).

2.3.4. Conclusion sur le sable

Sur le sable, le patin s'enfonce complètement. La profondeur des pics est donc un paramètre prépondérant. A profondeur de pics constante, l'angle β est de nouveau le paramètre influent. Le Graphique 2-19 présente le coefficient de frottement apparent à 5mm des patins en fonction de leur angle β .



Graphique 2-19 : Variation du coefficient de frottement sur le sable en fonction de l'angle d'attaque des pics

On observe de nouveau une décroissance du coefficient apparent lorsque l'angle d'attaque des pics augmente (le point des courbes pour $\beta=47^\circ$ ne doit pas être pris en compte, il correspond au patin avec des pics de 30 mm, ce qui augmente le coefficient de frottement apparent). Les points pour $\beta=90^\circ$ correspondent au patin plat, il a été inséré sur le Graphique 2-19 à titre de comparaison.

2.4. Conclusion des essais

Les essais ont montré l'influence de deux des trois paramètres testés sur les patins :

- La profondeur des pics entre en jeu lorsque le patin s'enfonce complètement dans le matériau. Plus le patin s'enfonce profondément, plus le coefficient est élevé. Dans les matériaux où le patin ne s'enfonce que peu (type roche ou argile très cohérente), la profondeur des pics n'influe évidemment pas.
- L'angle β d'attaque des pics semble jouer un rôle important : les courbes $k=f(\beta)$ (avec k : coefficient apparent de frottement) montrent que k diminue lorsque β augmente, et ce dans tous les types de matériaux.
- L'influence du troisième paramètre (nombre de pics) n'a pas pu être déterminée clairement. Les résultats semblent inchangés avec des patins à 2 ou 3 pics, ce qui joue en faveur d'une absence d'influence de ce paramètre due à la linéarité entre la force appliquée et l'enfoncement du patin, et entre l'enfoncement du patin et la force tangentielle nécessaire pour le déplacer.

En considérant 20mm d'enfoncement maximal autorisé, le patin optimal serait donc celui qui a l'angle d'attaque de ses pics le plus faible possible, tout en assurant la résistance mécanique du patin. En effet, plus cet angle est faible, plus le pic est effilé et risque de se plastifier ou de se rompre sous la contrainte imposée par la machine.

Le matériau le plus défavorable dans ces essais est le sable : c'est celui qui donne les coefficients de frottement apparents les plus faibles. En fixant 5mm de déplacement du patin, les coefficients des patins 20-32-2 et 20-32-3 sur le sable sont résumés dans le Tableau 2-10.

	Sable $w=2,8\%$; $\gamma=16\text{kN/m}^3$	Sable $w=7,8\%$; $\gamma=17\text{kN/m}^3$
patin 20-32-2	0,66	0,59
patin 20-32-3	0,52	0,65

Tableau 2-10 : Coefficients de frottement des patins avec $\beta=47^\circ$ sur le sable

Le coefficient minimal considéré pour le design des patins sera donc 0,5.

Sur un matériau de type argile, ce coefficient monte à 0,9.

Sur une roche de type calcaire tendre, ce coefficient vaut 1,1.

3. Dimensionnement du module de poussée

Avec la détermination expérimentale du coefficient apparent de frottement, il est maintenant possible de dimensionner tout le module de poussée. On s'attachera tout d'abord à expliquer le raisonnement qui aboutira au dimensionnement avant d'en détailler les différentes étapes.

3.1. Le raisonnement

La Figure 3-1 reprend la Figure 2-1 en précisant les différentes forces à l'œuvre sur la machine.

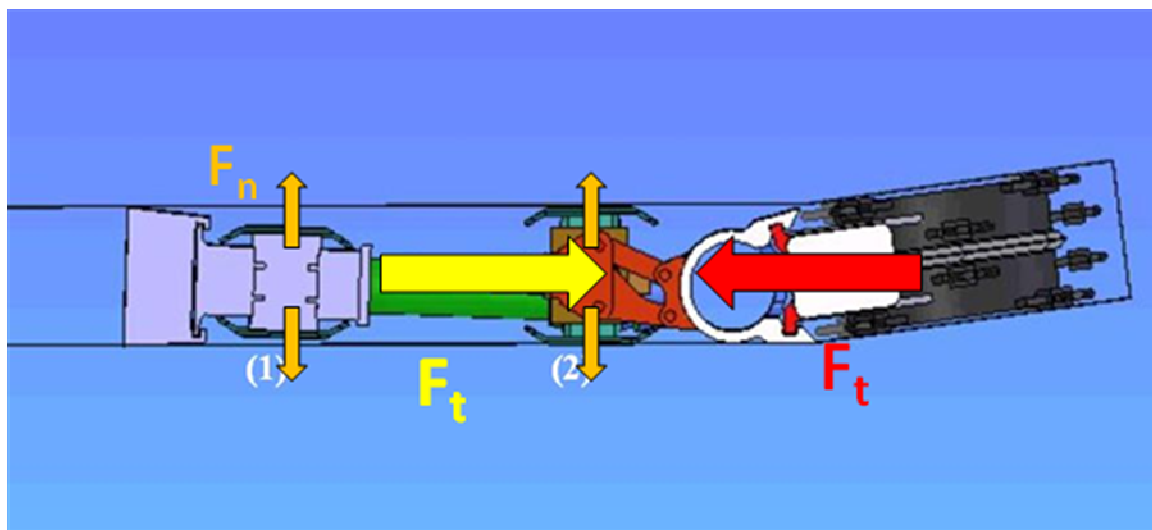


Figure 3-1 : Vue de haut du prototype du projet SCOUT ; schéma des forces

La force F_t indiquée en rouge sur la Figure 3-1 schématise la somme des forces à équilibrer par le système de grippeurs. Pour assurer la stabilité de la machine dans la tranchée, il faut que la force F_t représentée en jaune soit égale en norme à celle représentée en rouge, et de sens opposés. Pour mobiliser F_t , il faut appliquer sur les grippeurs une force normale F_n , selon les notations utilisées dans la partie 0 La première étape du travail consiste à évaluer les relations entre la tranchée et la machine, pour reprendre son dimensionnement. Ces relations seront estimées expérimentalement grâce à des expériences à la halle d'essais du Centre de Géosciences.

Objectif des essais. La relation entre F_t et F_n est bien sûr donnée par l'égalité $F_t = k.F_n$, avec k le coefficient apparent de frottement déterminé dans la partie précédente.

Ainsi, connaissant maintenant la valeur de k , pour déterminer la force F_n à appliquer sur les patins il faut déterminer la force F_t à équilibrer. La première partie du raisonnement consiste donc à réaliser une étude statique de la machine pour établir un bilan des forces en présence. Pour ce faire, il sera nécessaire de développer un nouveau design du module de poussée de la machine en modifiant les paramètres du projet SCOUT par ceux du projet TRACI.

Une fois le nouveau design du module de poussée déterminé et la force F_n évaluée, il faudra enfin calculer la surface minimale des grippeurs sur laquelle on peut répartir cette force. En

effet, suivant la formule $S = \frac{F_n}{\sigma}$ où σ est la contrainte appliquée sur la paroi de la tranchée par le grippeur. Or cette contrainte est limitée par la résistance de la tranchée : on ne veut pas détruire la tranchée en déployant les grippeurs. On devra donc évaluer cette contrainte maximale (notée $\sigma_{butée}$) de la tranchée pour calculer la surface minimale des grippeurs.

Pour conclure, on pourra déterminer la taille des grippeurs, et calculer le gain de poids obtenu grâce à ce nouveau design du module de poussée.

La Figure 3-2 résume le raisonnement développé dans cette partie.

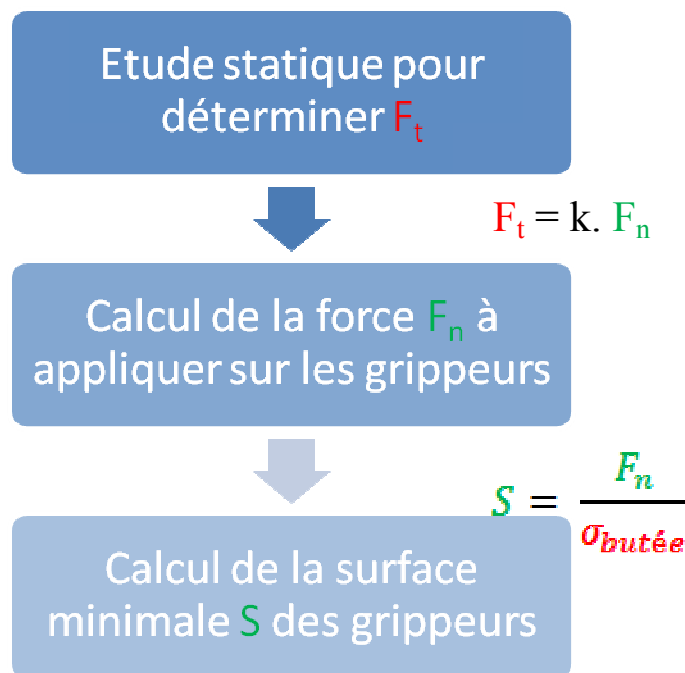


Figure 3-2 : Diagramme du schéma de raisonnement pour dimensionner le module de poussée (en rouge : paramètre à déterminer par une étude ; en vert : paramètres à calculer)

Les différentes sous-parties suivantes suivent le diagramme présenté en Figure 3-2.

3.2. Étude statique

La première étape pour aboutir à l'étude des forces en présence sur le prototype du projet TRACI est de définir les caractéristiques de ce prototype. La Figure 3-3 présente les modifications que subissent le prototype du projet SCOUT pour arriver au prototype du projet TRACI.

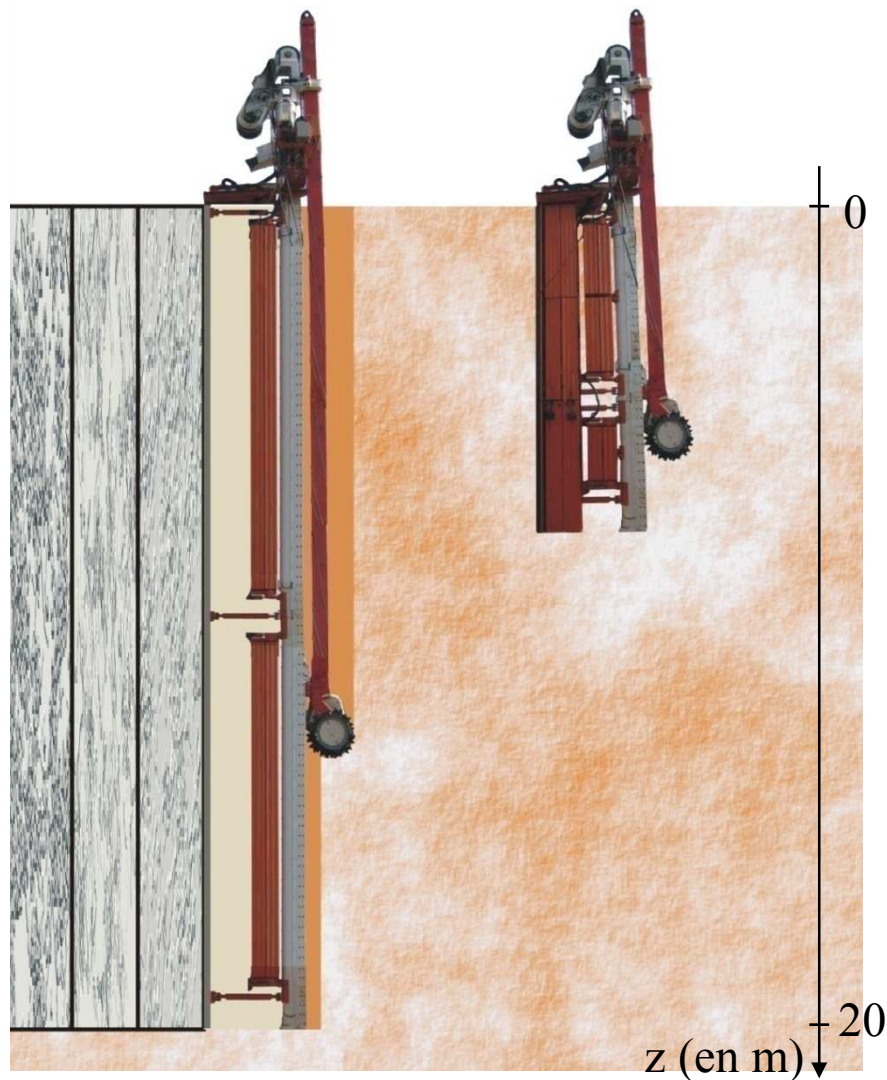


Figure 3-3 : Prototype imaginé du projet TRACI (à gauche) à partir du prototype du projet SCOUT (à droite)

Le prototype du projet TRACI à gauche sur la Figure 3-3 a été obtenu en modifiant l'image du prototype du projet SCOUT (à droite) :

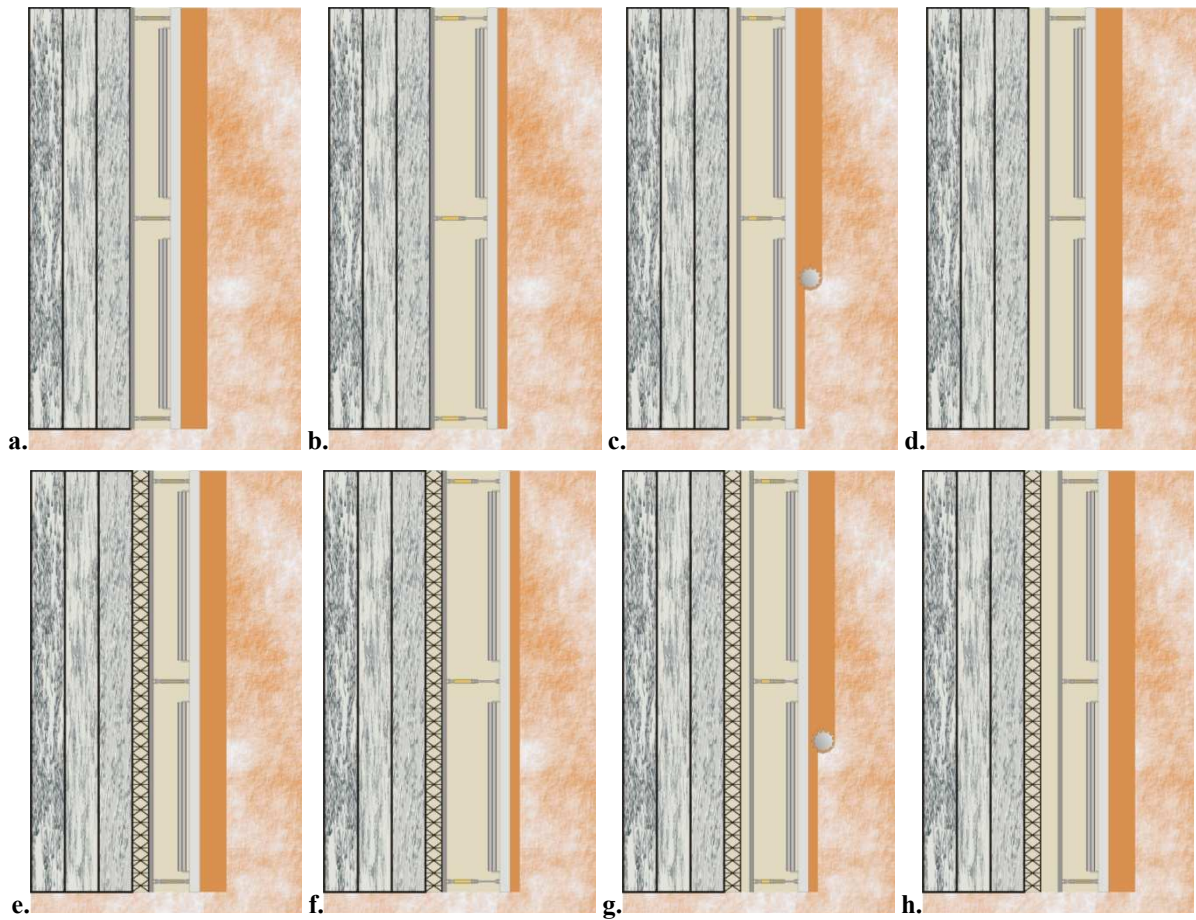
- la profondeur de la tranchée est passée de 8 à 20 mètres ;
- le béton situé à l'arrière de la machine est préfabriqué et mis en place sous forme de dalles précoffrées ;
- la machine peut désormais s'appuyer sur ces dalles préfabriquées et les gripeurs arrières sont devenus inutiles ;

- seuls trois des quatre vérins de poussée du prototype du projet SCOUT sont conservés pour éviter l'hyperstatisme du système (l'un des vérins du prototype SCOUT avait été retiré lors des essais de validation à Montereau).

Les caractéristiques du prototype imaginé du projet TRACI a donc les caractéristiques suivantes :

- 20 mètres de profondeur dans le sol ;
- deux gripeurs de huit mètres de haut seulement à l'avant de la machine (des deux cotés) entre les cotes $z = 1$ m et 9 m, et $z=11$ m et 19 m avec les notations de la Figure 3-3 ;
- trois vérins de poussée, aux cotes $z = 0,5$ m, $z = 10$ m et $z = 19,5$ m.

Il convient maintenant d'étudier la séquence de fonctionnement du prototype pour déterminer lors de quelle(s) phase(s) les gripeurs sont utilisés. La Figure 3-4 présente l'enchaînement des différentes phases de fonctionnement de la machine.



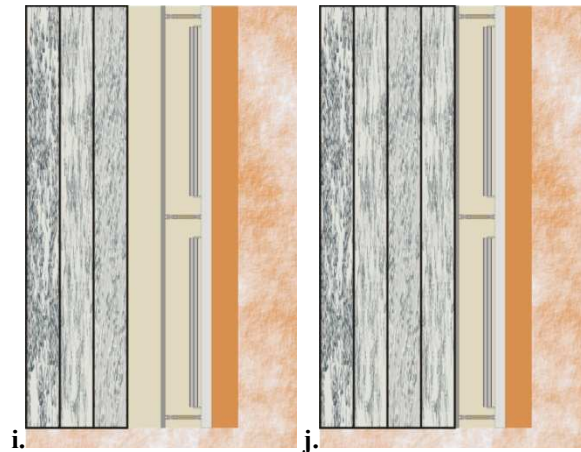


Figure 3-4 : Phases de fonctionnement du prototype TRACI

Sur la Figure 3-4 le prototype est schématisé avec ses éléments principaux : les trois vérins de poussée, les deux grippeurs, le bouclier avant permettant l'étanchéité entre la chambre d'abattage et la chambre directionnelle, et le tambour. On schématise en plus les plaques de béton préfabriquées à l'arrière et une entretoise. La séquence de phases de fonctionnement de la machine est la suivante :

- a. après une phase de coupe et de mise en place d'une plaque de béton
- b. phase de marinage : en s'appuyant sur le béton à l'arrière on déploie les vérins de poussée pour avancer la partie avant de la machine et activer la vis de marinage ;
- c. phase d'abattage : une fois le marinage terminé, les grippeurs sont déployés pour stabiliser la machine dans la tranchée, puis le tambour abat le terrain à l'avant en même temps que l'arrière de la machine est ramené (en temps masqué) ;
- d. fin de la phase d'abattage : la partie arrière a avancé de 80 centimètres
- e. mise en place d'une entretoise : pour la phase de marinage, la machine doit s'appuyer à l'arrière. Or il n'est pas possible de mettre en place une plaque de béton de 20 mètres de haut et seulement 80 centimètres de largeur. On installe donc temporairement une entretoise
- f. phase de marinage : on s'appuie sur l'entretoise
- g. phase d'abattage : les grippeurs sont sortis, on ramène l'arrière de la machine en temps masqué
- h. la partie arrière a avancé de 80 centimètres
- i. l'entretoise est retirée pour mettre en place une plaque de béton de 1,60 mètre de largeur (on a supposé qu'une plaque de 20 mètres de haut sur 1,60 mètre de largeur est réalisable ; dans le cas contraire, on installe une autre entretoise, ce jusqu'à qu'une largeur réalisable de plaque de béton soit atteinte) ;
- j. mise en place d'une plaque de béton.

On remarque que la seule phase où les grippeurs sont sortis est la phase d'abattage avec le retour de la partie arrière de la machine en temps masqué. C'est donc à partir de cette phase que le bilan des forces sera établi (présenté en Figure 3-5).

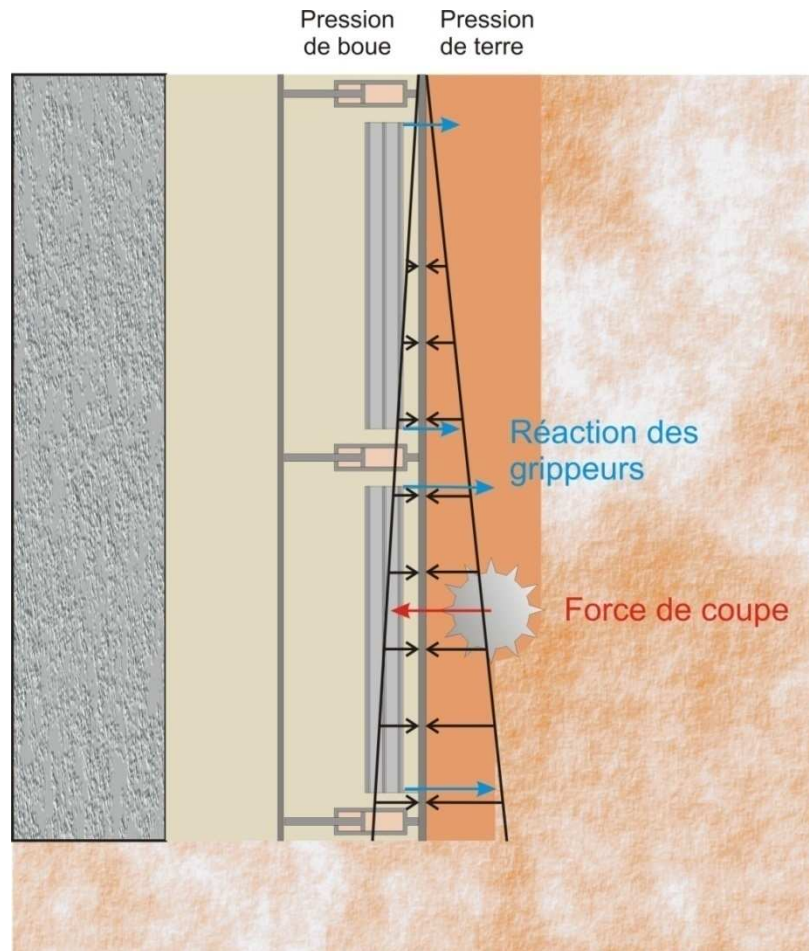


Figure 3-5 : Equilibre des forces lors de la phase d'abattage

Sur la Figure 3-5 on voit que quatre forces doivent s'équilibrer sur le bouclier avant de la machine, où est créée l'étanchéité entre la chambre d'abattage et la chambre directionnelle :

- la force de coupe F_c : lors des essais pour le développement du projet SCOUT, la force envoyée vers l'arrière de la machine lorsque le tambour est au couple maximal a été évaluée à 190 kN. Le couple maximal peut être atteint dans tout type de terrain, par exemple dans du sable si le tambour bloque sur un rocher. On ne distinguera donc pas les divers types de terrains et on considérera pour le dimensionnement $F_c = 190$ kN ;
- la pression de terre à l'avant : le mélange des cuttings et de mousse à l'avant de la machine crée une pâte qui assure la stabilité de la chambre d'abattage (c'est le principe du tunnelier à pression de terre). Selon les caractéristiques données par le fabricant de la mousse, le poids volumique de la pâte obtenue est de 14 kN/m³ ;
- pour assurer la stabilité de la tranchée au niveau de la chambre directionnelle, on utilise de la boue dont le poids volumique est estimé à $10,5$ kN/m³ ;
- la réaction des grippeurs que l'on doit calculer afin qu'elle équilibre les autres forces ; on notera respectivement F_{t1} et F_{t2} les réactions des grippeurs du haut et du bas.

Ne sachant comment les estimer, on néglige les forces de frottement de la machine avec la tranchée au niveau du bouclier avant (ces forces aident à maintenir la machine immobile, le dimensionnement est donc valide si on les néglige). On néglige de même toutes les forces

nécessaires pour ramener l'arrière de la machine en temps masqué, ce qui se justifie par le fait qu'il n'y a pas d'étanchéité à ce niveau-ci, tout est plongé dans la boue. Si la partie arrière ne touche pas la tranchée, les seules forces en présence sont les frottements machine/boue qui sont faibles car la vitesse à laquelle l'arrière de la machine est ramené est faible.

La tranchée fait 60 centimètres de largeur et 20 mètres de haut. La résultante des forces de pression exercée par la pâte à l'avant ($\gamma_{p\grave{a}te} = 14 \text{ kN/m}^3$) et la boue à l'arrière ($\gamma_{boue} = 10,5 \text{ kN/m}^3$) est identique à une résultante qui serait engendrée par un fluide de poids volumique $\gamma_{p\grave{a}te} - \gamma_{boue}$, c'est-à-dire $\gamma_{\text{équivalent}} = 3,5 \text{ kN/m}^3$ à l'avant et rien à l'arrière. La résultante des

force de pression vaut donc : $F_{\text{pression}} = \frac{1}{2} h^2 \times b \times \gamma_{\text{équivalent}} = 420 \text{ kN}$. Un quart de cette force doit être équilibrée par le gripeur du haut (105 kN) et trois quarts par le gripeur du bas (315 kN) car le profil de cette force appliquée sur le bouclier est linéaire en fonction de la profondeur.

Il faut encore ajouter la force de coupe. Lorsque la profondeur du tambour est comprise entre 1 et 9 mètres, et entre 11 et 19 mètres, le tambour se trouve devant un gripeurs. Si cette force n'est pas répartie, toute F_c doit alors être équilibrée par ce gripeur. Lorsque le tambour est entre deux gripeurs, la force est répartie entre ces deux gripeurs ; chaque gripeurs doit alors équilibrer une force inférieure à F_c . On dimensionnera donc les gripeurs en supposant que chacun d'entre eux doit être capable d'équilibrer toute la force de coupe F_c en plus des forces de pression F_{pression} .

Au final on obtient en fonctionnement normal :

$$\begin{aligned} F_{t1} &= 295 \text{ kN} \\ F_{t2} &= 505 \text{ kN} \end{aligned}$$

On considère aussi le cas où la machine perd rapidement toute la boue de la chambre directionnelle, ce qui peut arriver lorsqu'elle rencontre un karst par exemple. A ce moment-là le tambour est arrêté, on ne doit plus compter F_c dans l'équilibre des forces. En revanche, la pression de boue n'aide plus à la stabilité de la machine, on doit compter $\gamma_{p\grave{a}te}$ entièrement. On

obtient donc $F_{\text{pression}} = \frac{1}{2} h^2 \times b \times \gamma_{p\grave{a}te} = 1680 \text{ kN}$. De la même manière on répartit un quart de cette force sur le gripeur en haut et trois quart en bas, on obtient :

$$\begin{aligned} F_{t1} &= 420 \text{ kN} \\ F_{t2} &= 1260 \text{ kN} \end{aligned}$$

Il est maintenant possible de calculer la force normale à appliquer sur chaque gripeur (F_{n1} en haut et F_{n2} en bas) au moyen du coefficient $k = 0,5$ déterminé dans la partie 2.4 *Conclusion des essais* :

- en fonctionnement normal, on obtient $F_{n1} = 590 \text{ kN}$ et $F_{n2} = 1010 \text{ kN}$;
- en cas de perte de boue, $F_{n1} = 840 \text{ kN}$ et $F_{n2} = 2520 \text{ kN}$.

Or il y a deux gripeurs à chaque niveau (un sur chaque coté de la tranchée), la force à appliquer sur chaque plaque est donc :

- en fonctionnement normal, on applique **295 kN** en haut et **505 kN** en bas sur chaque plaque ;
- en cas de perte de boue, on applique **420 kN** en haut et **1260 kN** en bas sur chaque plaque.

On peut maintenant calculer la surface minimale des gripeurs

3.3. Dimensionnement des grippeurs

3.3.1. Stabilité en butée de la tranchée

Pour calculer la surface minimale des grippeurs, il faut évaluer la contrainte maximale que peuvent supporter les parois de la tranchée. Pour ce faire, un premier calcul de poussée – butée est envisagé, avec un forme de décrochement du sol présentée sur la Figure 3-6.

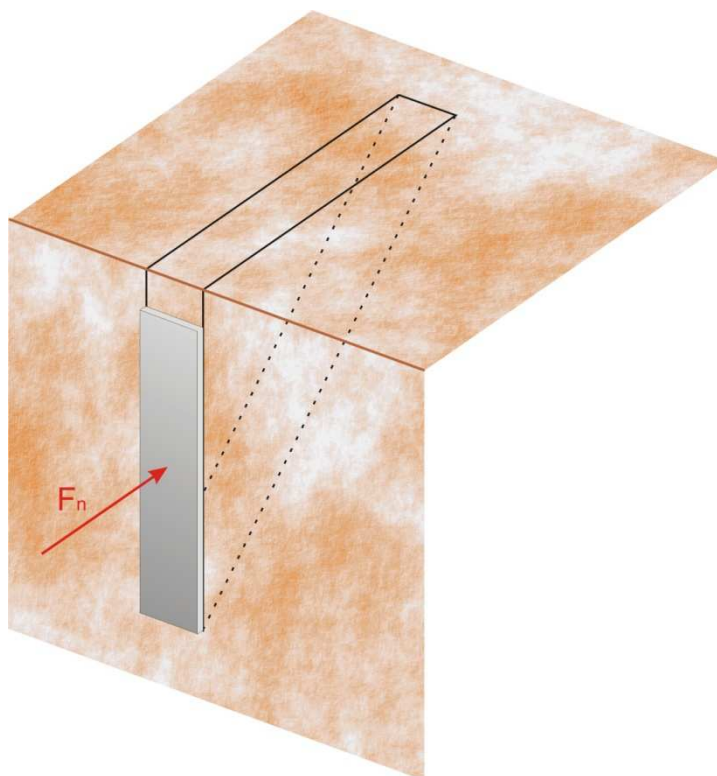


Figure 3-6 : Rupture 2D d'une tranchée soumise à une contrainte exercée par une plaque

La forme de la rupture présentée en Figure 3-6 est très pessimiste. En effet avec une plaque de 8 mètres de haut et seulement quelques décimètres de largeur, la rupture aura plutôt tendance à avoir la forme d'un coin 3D présenté en Figure 3-8. Néanmoins cette approximation a l'avantage d'avoir une solution analytique simple qui permet un premier calcul d'ordre de grandeur.

On considère un massif homogène. Les paramètres pris en compte sont récapitulés dans le Tableau 3-1.

Symbole	Signification	Valeur considérée
c_u	résistance au cisaillement du sol non drainé	50 kPa
c'	cohésion effective	50 kPa
φ	angle de frottement interne	20°
φ'	angle de frottement interne effectif	10°
γ	poids volumique du sol	18 kN/m ³

γ	pois volumique du sol déjaugé	10 kN/m ³
----------	-------------------------------	----------------------

Tableau 3-1 : Paramètres du calcul de butée de la tranchée

Les différents paramètres du Tableau 3-1 seront pris en compte pour les trois comportements de sols que l'on considérera :

- sol cohérent de type argile en comportement non drainé, c'est-à-dire sans frottement interne : c_u et γ correspondent à une argile moyenne ;
- sol pulvérulent sans cohésion : φ correspond à un sable de faible frottement interne
- comportement drainé, avec c' , φ' et γ' .

Ces calculs de butée se placent dans le cas simple d'un massif de sol semi-infini, homogène et isotrope à surface horizontale. On obtient les résultats suivants (François Schlosser, 1990) en fonction de la profondeur z , $\sigma_{butée}$ représentant la contrainte limite à laquelle le massif est en butée, c'est-à-dire à la limite de la rupture :

- sol cohérent : $\sigma_{butée} = 2c_u + \gamma z$;
- sol pulvérulent : $\sigma_{butée} = K_p \gamma z$ avec $K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$;
- sol drainé : $\sigma_{butée} = K'_p \gamma' z + 2c' \sqrt{K'_p}$ avec $K'_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right)$.

En réalisant les applications numériques (en bars), on obtient :

- sol cohérent : $\sigma_{butée} = 1 + 0,18z$ soit 1 bar en surface et 3,6 bars à 20 mètres de profondeur ;
- sol pulvérulent : $\sigma_{butée} = 0,36z$ soit 0 bar en surface et 7,2 à 20 mètres de profondeur ;
- sol drainé : $\sigma_{butée} = 1,2 + 0,13z$ soit 1,2 bars en surface et 3,8 bars à 20 mètres de profondeur.

Ces résultats méritent d'être commentés : en toute rigueur le chargement du la paroi de la tranchée par le gripeur est rapide, donc on est dans un comportement non drainé, avec seulement une cohésion à prendre en compte. Néanmoins, ce comportement de sol est purement théorique, et on lui préférera le comportement drainé qui prend en compte un faible angle de frottement interne. De plus ces deux modèles sont proches, le modèle drainé limitant plus la contrainte en butée en profondeur. En ce qui concerne le comportement d'un matériau pulvérulent, étant donné que $\sigma_{butée}$ varie linéairement avec z , il est fortement pessimiste pour

les faibles profondeurs. Il serait impossible de garantir la stabilité de la tranchée dans un terrain sans cohésion, ce modèle ne sera donc pas retenu.

En définitive, on dimensionnera les grippeurs à partir d'un comportement drainé du sol. Le profil de $\sigma_{\text{butée}}$ en fonction de la profondeur est présenté sur la Figure 3-7.



Figure 3-7 : Contrainte maximale à appliquer pour éviter la rupture des parois de la tranchée

Le résultat présenté en Figure 3-7 illustre la variation affine de $\sigma_{\text{butée}}$ en fonction de la profondeur : plus le grippeur est profond, plus il peut appuyer sur le sol du fait du poids des terrains qui s'oppose à la destruction de la tranchée.

Mais ce résultat n'est qu'un ordre de grandeur, pour obtenir un résultat plus précis il faudrait considérer une rupture 3D de la tranchée présentée en Figure 3-8.

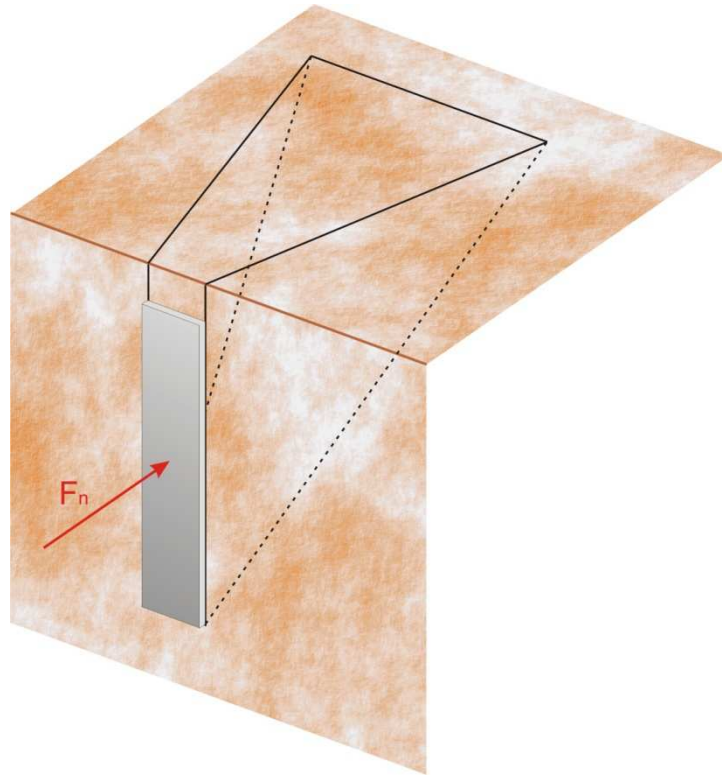


Figure 3-8 : Rupture 3D d'une tranchée soumise à une contrainte exercée par une plaque

L'inconvénient de la forme 3D de rupture présentée en Figure 3-8 est qu'elle n'admet pas de solution analytique simple. Un calcul par éléments finis pourra être réalisé dans la suite du projet, mais pour la suite de cette étude les résultats de l'étude 2D seront considérés pour obtenir un premier ordre de grandeur.

On peut maintenant repenser le design des grippeurs pour enfin calculer leur dimension.

3.3.2. Design et dimensions des grippeurs

Les grippeurs du projet SCOUT avaient deux principaux inconvénients : leur poids (6 tonnes) et leur complexité (48 vérins et 24 guides pour les articuler). Deux types d'objectifs peuvent donc être recherchés, l'allègement ou la simplification.

La première possibilité de simplifier le mécanisme est simple à mettre en œuvre, il s'agit de supprimer l'articulation des grippeurs (voir Figure 3-9).



Figure 3-9 : Articulation des grappeurs sur le prototype du projet SCOUT

La Figure 3-9 montre que chaque grappeur du prototype du projet SCOUT était articulé afin de permettre à la machine de mieux épouser la tranchée dans les courbes. Ce mécanisme entraînait le doublement des éléments (vérins et guides) et des circuits hydrauliques. Pour simplifier le mécanisme, on supprime cette articulation. En effet, son utilité n'a jamais été prouvée alors que ses inconvénients sont évidents.

Le prochain choix de design pour les grappeurs (présenté en Figure 3-10) diffère selon l'objectif que l'on cherche à atteindre.

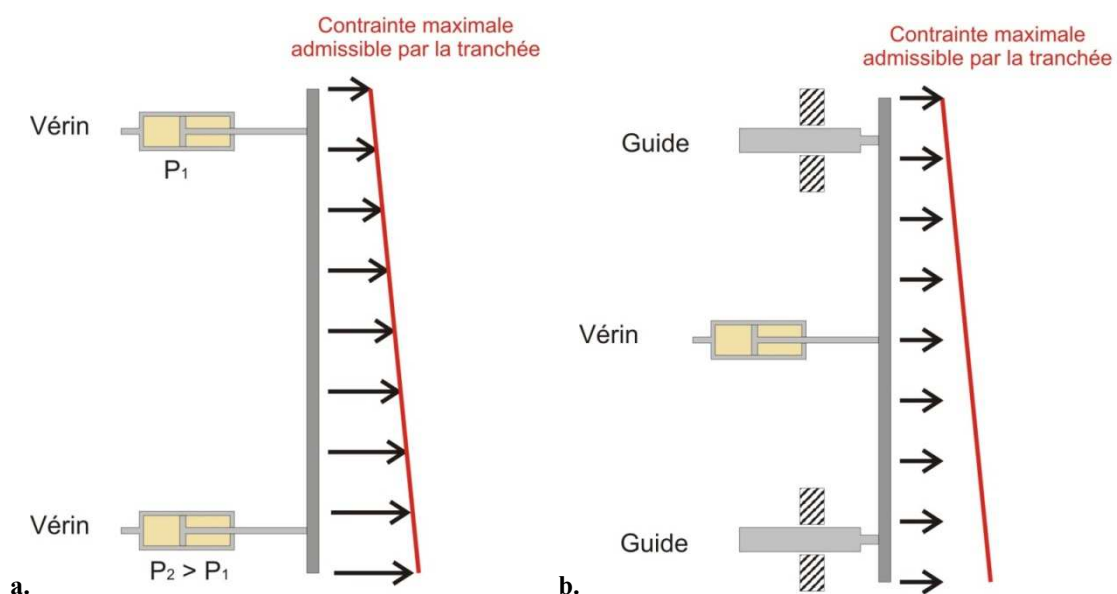


Figure 3-10 : Deux conceptions différentes pour les grappeurs (a. minimiser la surface ; b. simplifier le mécanisme)

Sur la Figure 3-10 à gauche, la présence de deux vérins permet d'appliquer une contrainte plus forte en bas du grappeur, et ainsi d'épouser le profil de contrainte en butée de la tranchée.

A l'inverse, à droite la présence d'un seul vérin impose une contrainte homogène sur toute la hauteur du gripeur, et oblige donc à ne pas appuyer plus que ce que la tranchée peut supporter en haut du gripeur. En résumé, la contrainte moyenne avec laquelle on peut appuyer avec le gripeur de gauche est supérieure à celle du design de droite, et ainsi la surface du gripeur à gauche est inférieure à celle du gripeur en Figure 3-10 b.

En revanche, le design de gauche compte deux fois plus de vérins que celui de droite, et implique un ensemble de circuits hydrauliques plus complexe.

Les largeurs des patins correspondant aux deux designs en fonctionnement normal de la machine sont présentées dans le Tableau 3-2, celles en cas de perte de boue dans le Tableau 3-3.

	Design pour minimiser la surface	Design pour simplifier le mécanisme
Largeur du gripeur en haut	20 cm	28 cm
Largeur du gripeur en bas	20 cm	24 cm

Tableau 3-2 : Dimensionnement des gripeurs en cas de fonctionnement normal de la machine

	Design pour minimiser la surface	Design pour simplifier le mécanisme
Largeur du gripeur en haut	28 cm	40 cm
Largeur du gripeur en bas	50 cm	58 cm

Tableau 3-3 : Dimensionnement des gripeurs en cas de perte de boue

Sachant que la largeur des patins du prototype du projet SCOUT était de 65 centimètres, on remarque que l'on a réussi à la réduire de manière notable.

Le cas de perte de boue est très pénalisant pour la largeur des gripeurs, alors qu'il s'agit d'un cas très improbable. L'un des défauts lors du dimensionnement du prototype SCOUT a été de tout le temps prendre en compte les hypothèses les plus pessimistes, ce qui a abouti à une machine lourde et surdimensionnée. Pour éviter de commettre la même erreur sur le prototype TRACI, on ne prendra en compte que le fonctionnement normal de la machine pour le dimensionnement.

Le cas de perte de boue sera donc considéré comme une situation d'urgence, qui nécessite une réaction particulière pour bloquer la machine dans la tranchée, par exemple appliquer une force supérieure sur les gripeurs quitte à déformer un peu plus la tranchée à un endroit particulier. Avec un tel choix, la largeur minimale des gripeurs sera de **28 cm en haut et 24 cm en bas** (voir Tableau 3-3).

Il faut aussi garder à l'esprit qu'une hypothèse pessimiste de rupture 2D de la tranchée a été conservée. En appliquant une rupture 3D, plus réaliste, on obtiendrait une contrainte de butée supérieure, car le cône de terrain à déplacer serait plus volumineux. La taille minimale des patins en serait donc encore réduite. Un autre critère doit alors entrer en jeu : on veut pouvoir placer au moins deux, peut-être trois pics sur la largeur du grippeur, et il ne faut pas que la déformation du terrain engendrée par un pic interfère avec le pic suivant. Ainsi, le dimensionnement du grippeur n'est peut-être pas conditionné par la rupture de la tranchée mais par la possibilité de placer plusieurs pics sur le grippeur.

En définitive, les largeurs proposées d'une trentaine de centimètres semblent être adaptées même en cas de calcul plus favorable de la rupture de la tranchée. Il reste maintenant à designer tout le module de poussée et à calculer le gain de masse réalisé.

3.4. Nouveau design du module de poussée et gain de poids

La Figure 3-11 présente les poids des différents gripeurs sur le prototype SCOUT.

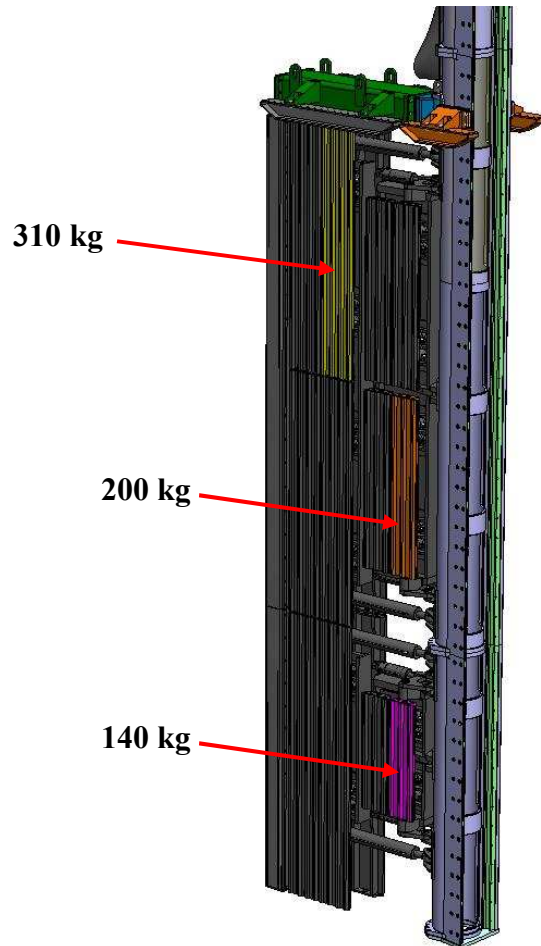


Figure 3-11 : Masse des différents gripeurs sur le prototype du projet SCOUT

Les masses de la Figure 3-11 ont été obtenues à partir du dessin technique sous SolidWorks du prototype SCOUT. Il faut ajouter à ces masses celle du gripeur arrière au fond, plus élevée que celle des deux rangées au-dessus : 370 kg (obtenue au prorata de la taille du gripeur). Les masses des vérins des gripeurs, des guides, des vérins de poussée et de la structure permettant d'accrocher les gripeurs ont aussi été évaluées grâce au volume de ceux-ci et avec la masse volumique de l'acier. Le Tableau 3-4 présente l'ensemble de ces masses, et ce qu'elle auraient été en adoptant le nouveau design.

	Ancien design	Nouveau design
Grippeurs à l'avant, en haut	200 × 8 = 1600 kg	200 × 4 = 800 kg
Grippeurs à l'avant, en bas	140 × 4 = 560 kg	140 × 2 = 280 kg
Grippeurs à l'arrière, en haut	310 × 8 = 2480 kg	0 kg
Grippeurs à l'arrière, en bas	370 × 4 = 1480 kg	0 kg
Structure arrière (pour les grippeurs)	2910 kg	0 kg
Structure avant (pour les grippeurs)	1370 kg	686 kg
Vérins des grippeurs	21,7 × 48 = 1040 kg	21,7 × 4 = 87 kg
Guides des grippeurs	19,3 × 24 = 464 kg	19,3 × 8 = 154 kg
Vérins de poussée	158,6 × 4 = 635 kg	158,6 × 3 = 475 kg
Autres éléments	4,6 t	4,6 t
TOTAL	17,2 t	7,1 t

Tableau 3-4 : Masses des éléments du module de poussée du prototype du projet SCOUT, ancien et nouveau design.

Les masses du Tableau 3-4 pour le nouveau design ont été obtenues avec les hypothèses suivantes :

- pour les grippeurs avant, la largeur a été divisée par deux, ce qui revient à supprimer l'articulation et ne garder qu'un coté de l'articulation ;
- les grippeurs arrières sont supprimés, ainsi que la structure les supportant ;
- la largeur de la structure avant a été divisée par deux à l'instar des grippeurs qu'elle supporte ;
- le nombre de vérins est passé de 48 à 4 ;
- le nombre de guides est passé de 24 à 8 ;
- le nombre de vérins de poussée est passé de 4 à 3 ;
- les autres éléments (vérins directionnels, liaisons au bouclier avant) sont inchangés.

En définitive, environ 10 tonnes ont été gagnées sur le module de poussée du prototype SCOUT. Ce gain de poids est surtout dû à la suppression des grippeurs et de la structure à l'arrière, qui entraîne la suppression de vérins et de guides (7,6 tonnes), suivie de l'allègement des grippeurs et de la structure à l'avant, et la réduction du nombre d'éléments (2,3 tonnes).

En appliquant un calcul identique sur le module de poussée du prototype du projet TRACI, on obtient que sa masse avec l'ancien design aurait été de 39 tonnes, alors qu'elle ne serait que de 15 tonnes avec le nouveau design.

Conclusion

Les expériences à la halle d'essais du Centre de Géosciences ont permis d'améliorer la connaissance de interactions entre le patin et le sol, et d'évaluer le coefficient de frottement apparent à 0,5 avec les patins ayant les pics les plus acérés. Les grippeurs les plus performants seront donc ceux qui auront des pics avec un angle le plus aigu possible. Pour calculer l'angle qui sera retenu, il faudra évaluer la résistance du grippeurs. En effet, plus l'angle est faible, plus le pic perd en résistance. Le but est d'obtenir l'angle le plus faible possible qui garantisse la solidité du grippeur.

Le design proposé pour les grippeurs peut aussi présenter un « problème d'encrochage ». En effet, lorsque le patin rentre dans la tranchée et que la machine abat le terrain à l'avant, la machine recule légèrement, et du matériau peut rester collé entre les pics. Après plusieurs cycles, il est possible que l'espace inter-pics soit totalement comblé, et le coefficient de frottement serait alors le coefficient de frottement interne du matériau, bien plus faible que celui espéré.

Pour toutes ces remarques, un essai à plus grande échelle semble nécessaire pour valider les résultats obtenus expérimentalement.

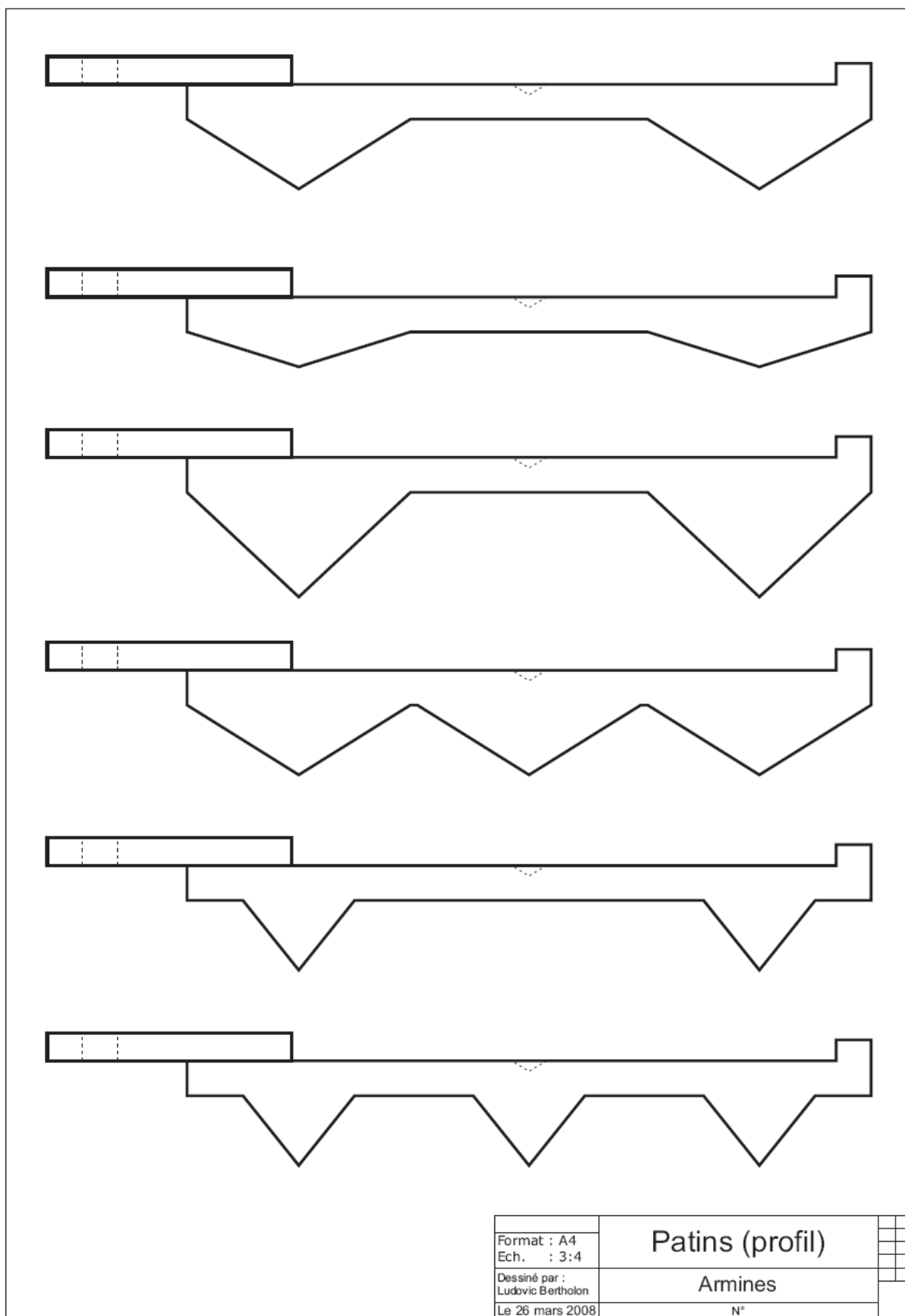
Concernant le design du module de poussée, les gains de masse ont été obtenus après une réduction drastique des éléments constituant ce module. Il faudra bien sûr effectuer un calcul de structure pour vérifier que le design proposé est suffisamment résistant et ne risque pas de casser.

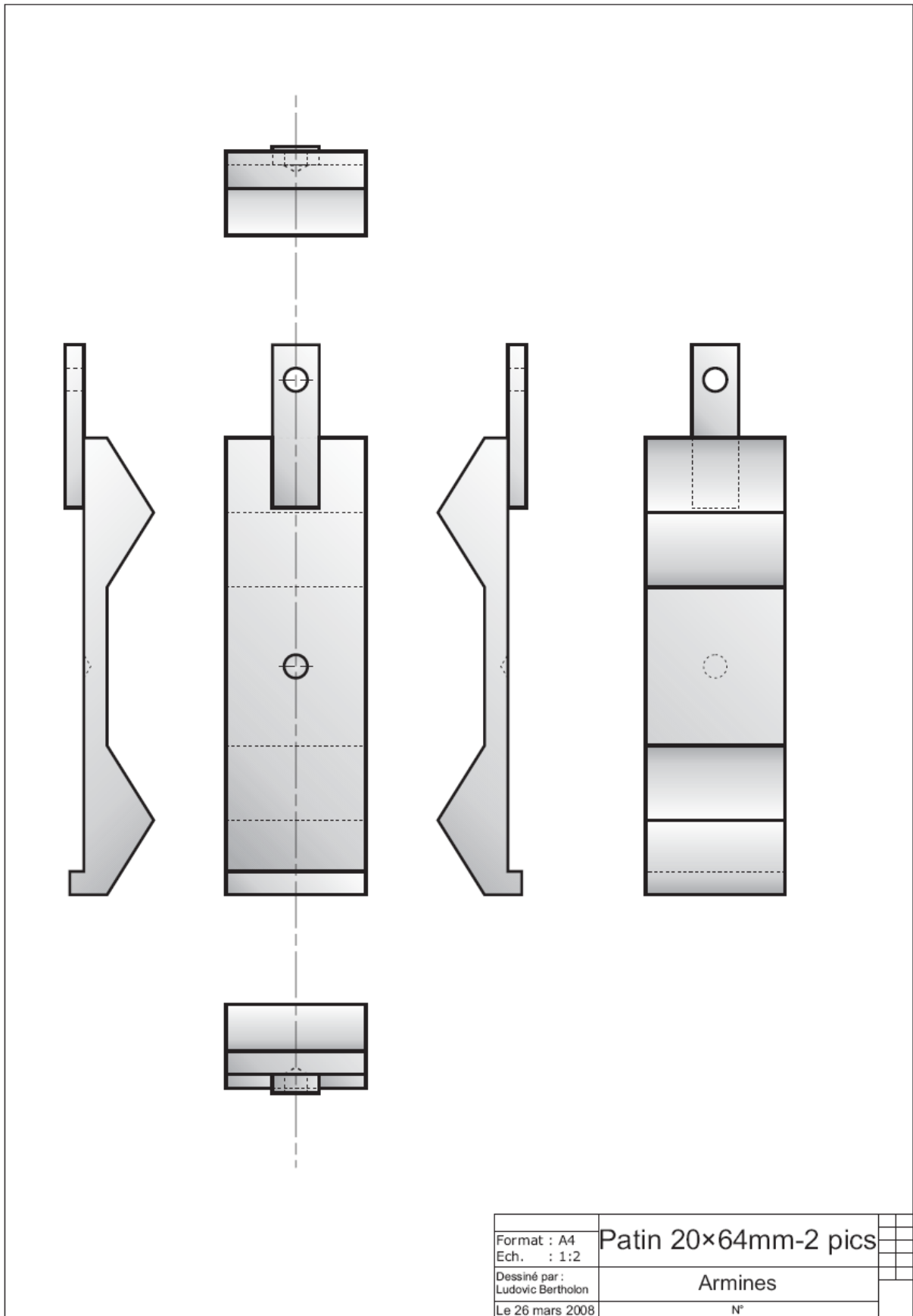
Bibliographie

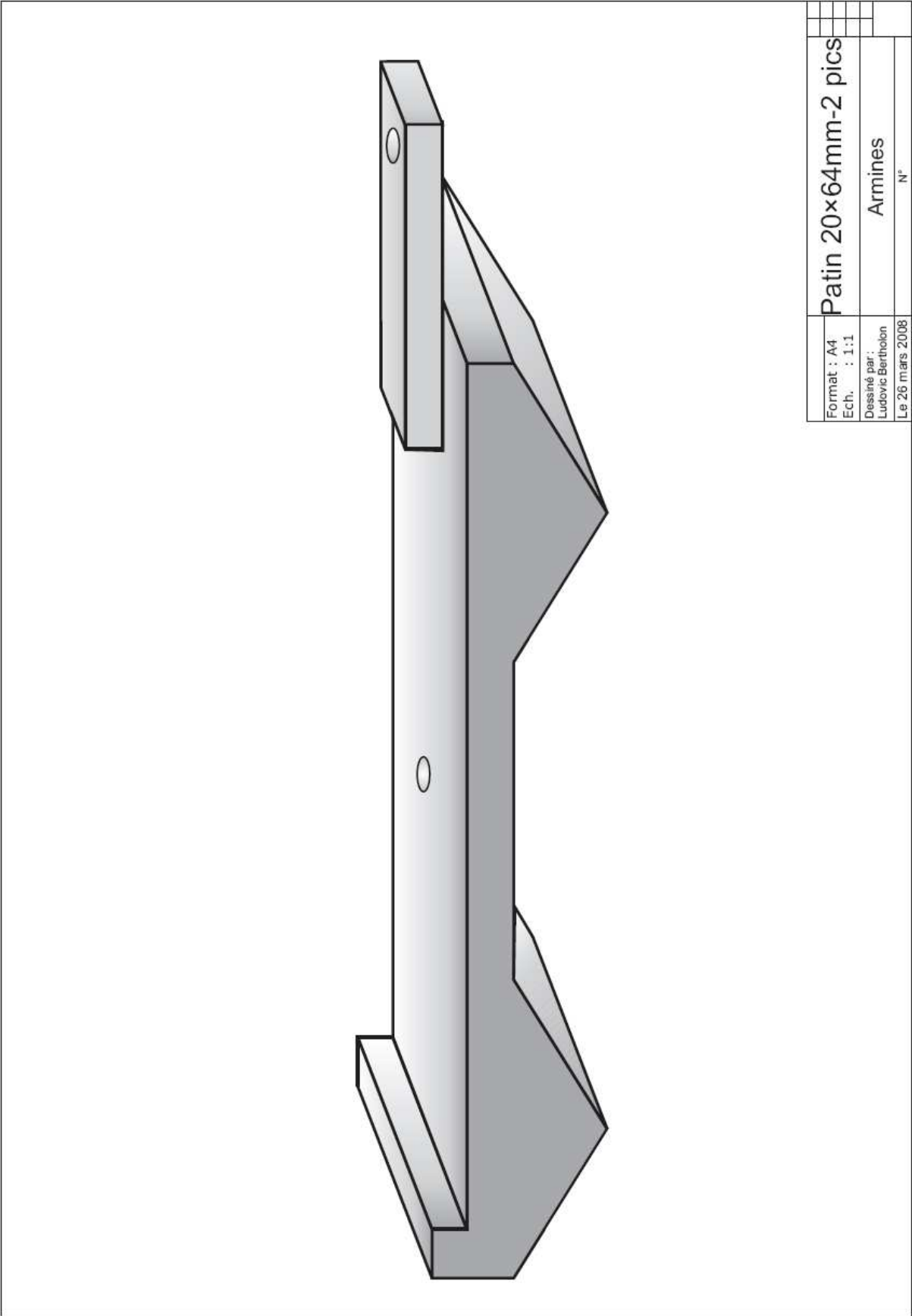
François Schlosser. 1990 Ouvrages de soutènement, poussée et butée (Techniques de l'ingénieur)

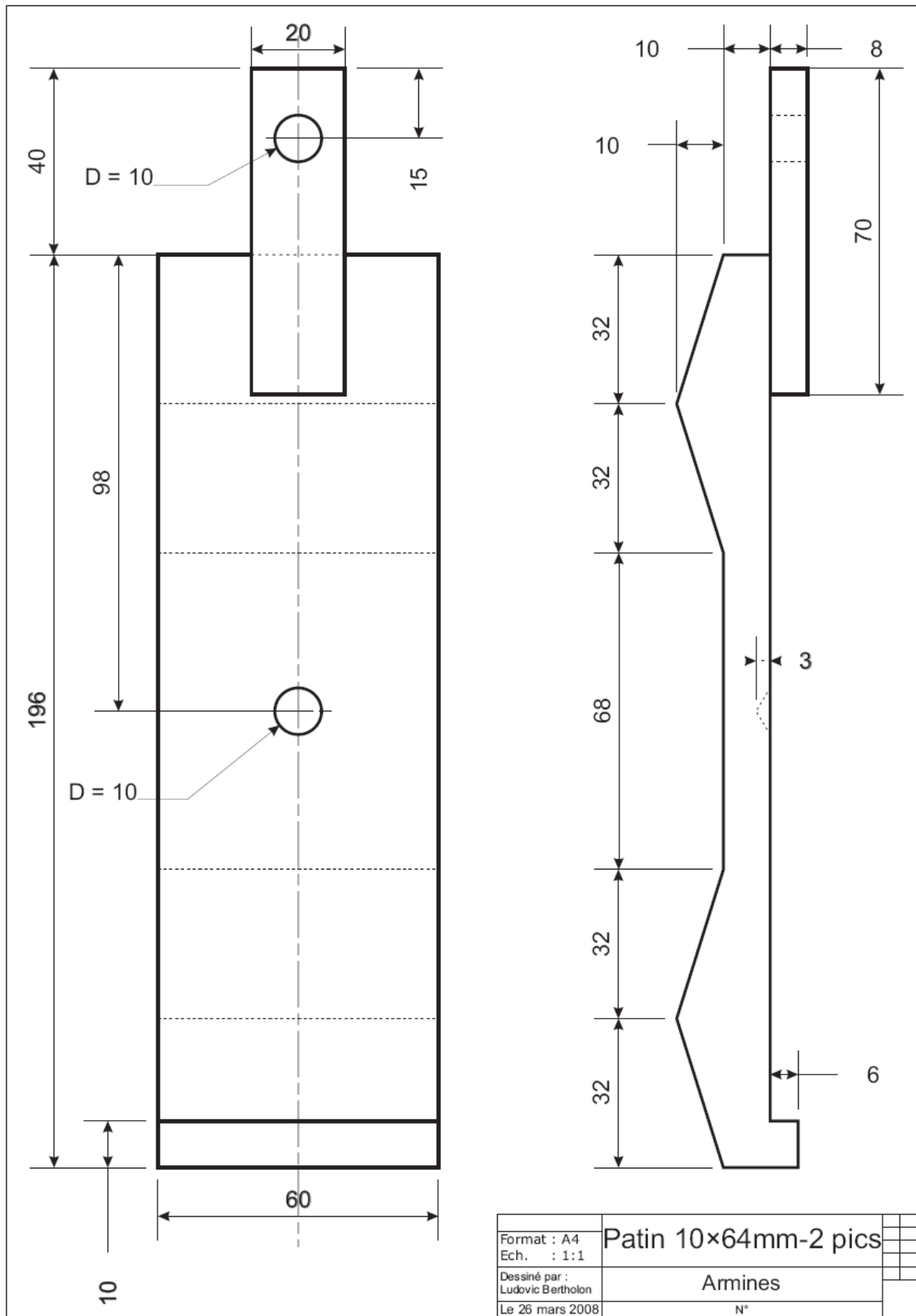
Annexes

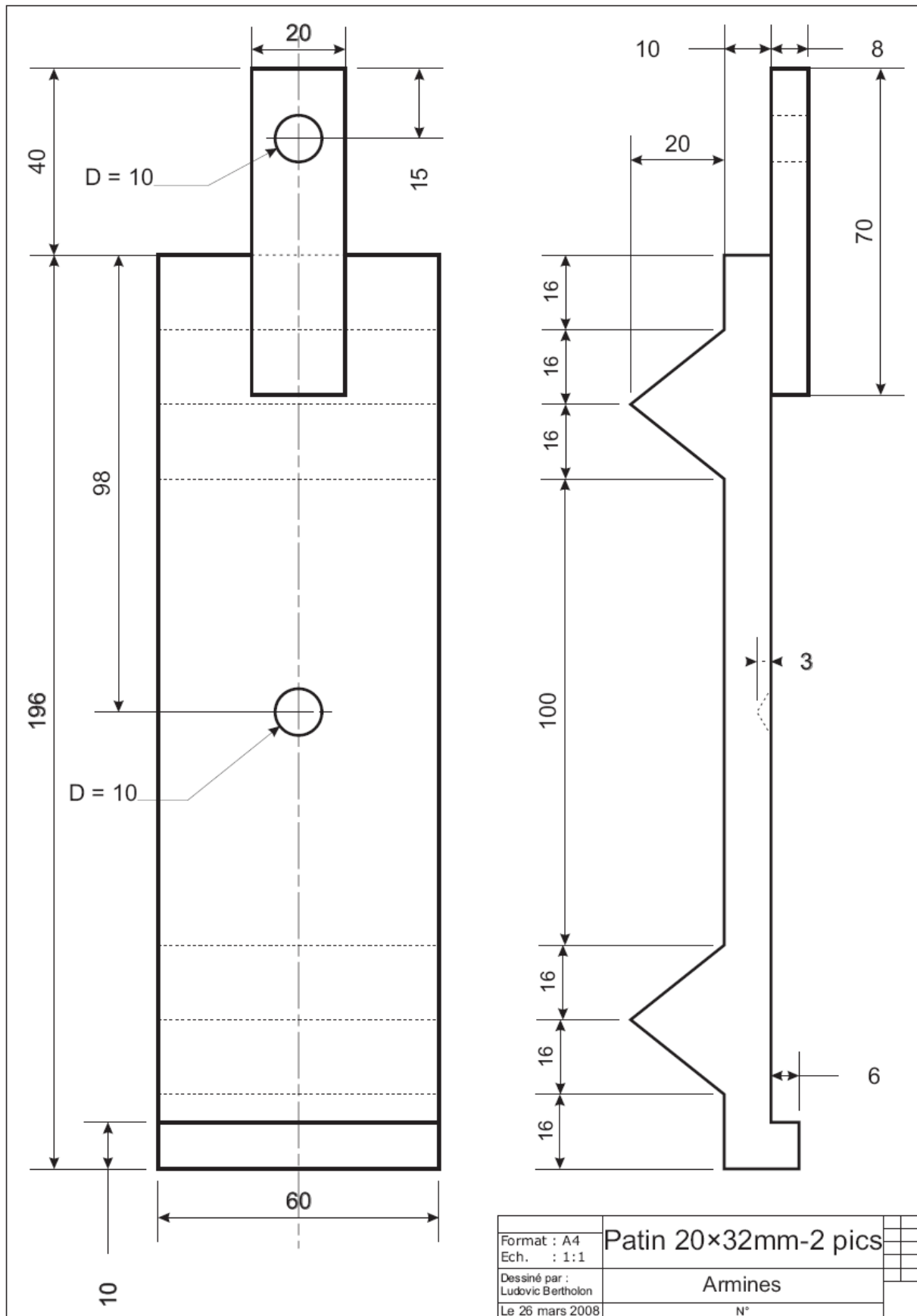
Annexe A : Plan des patins

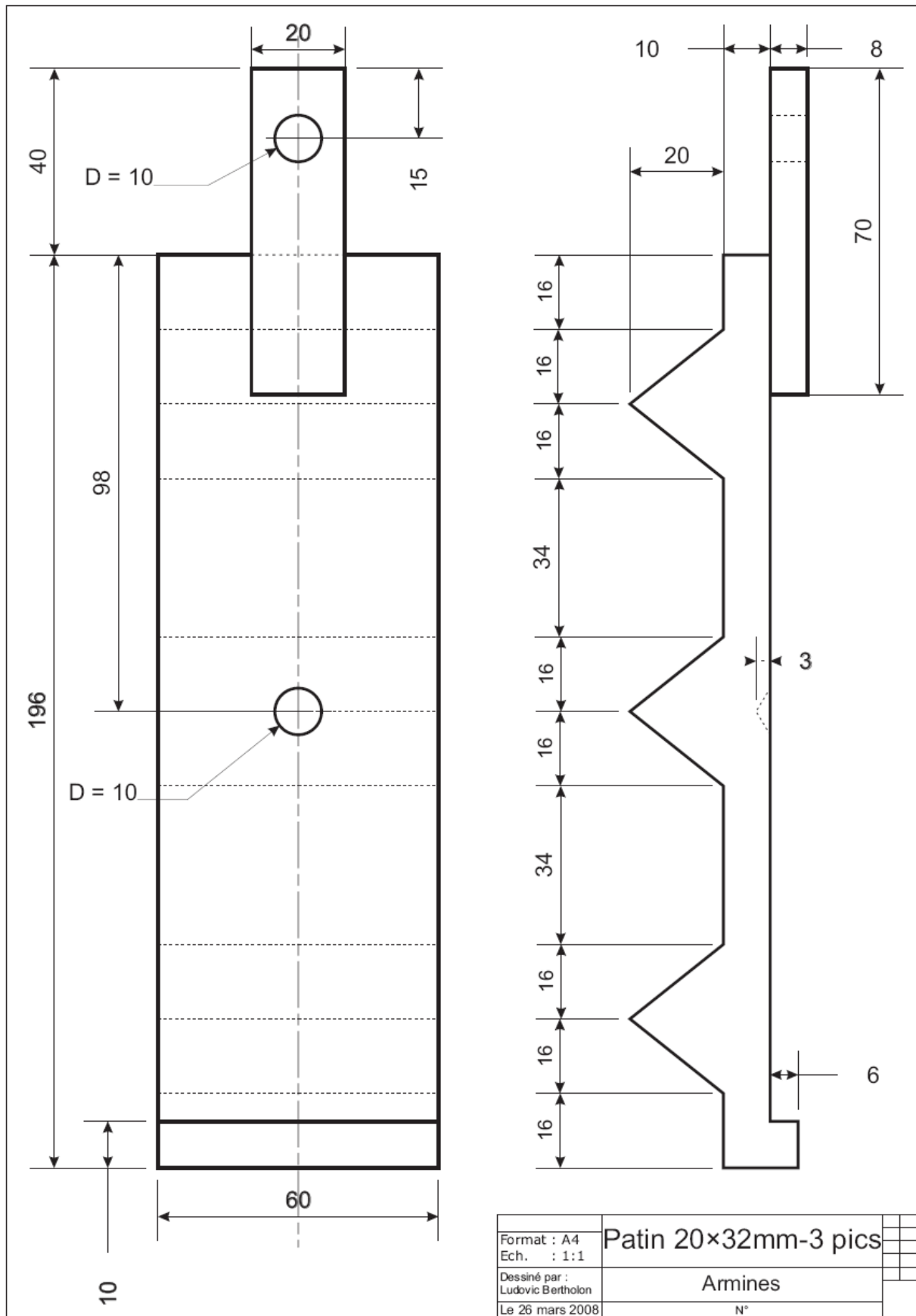


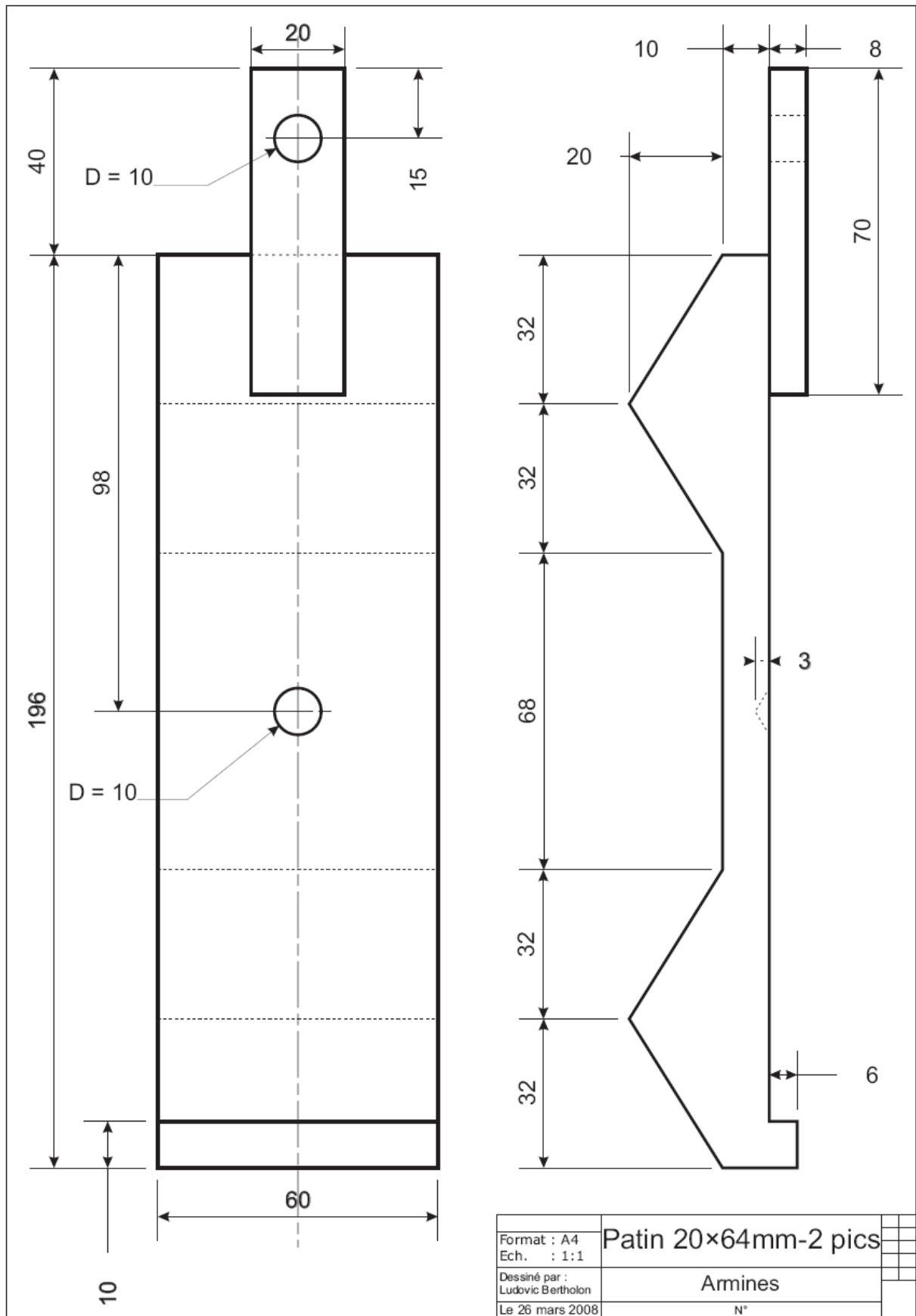


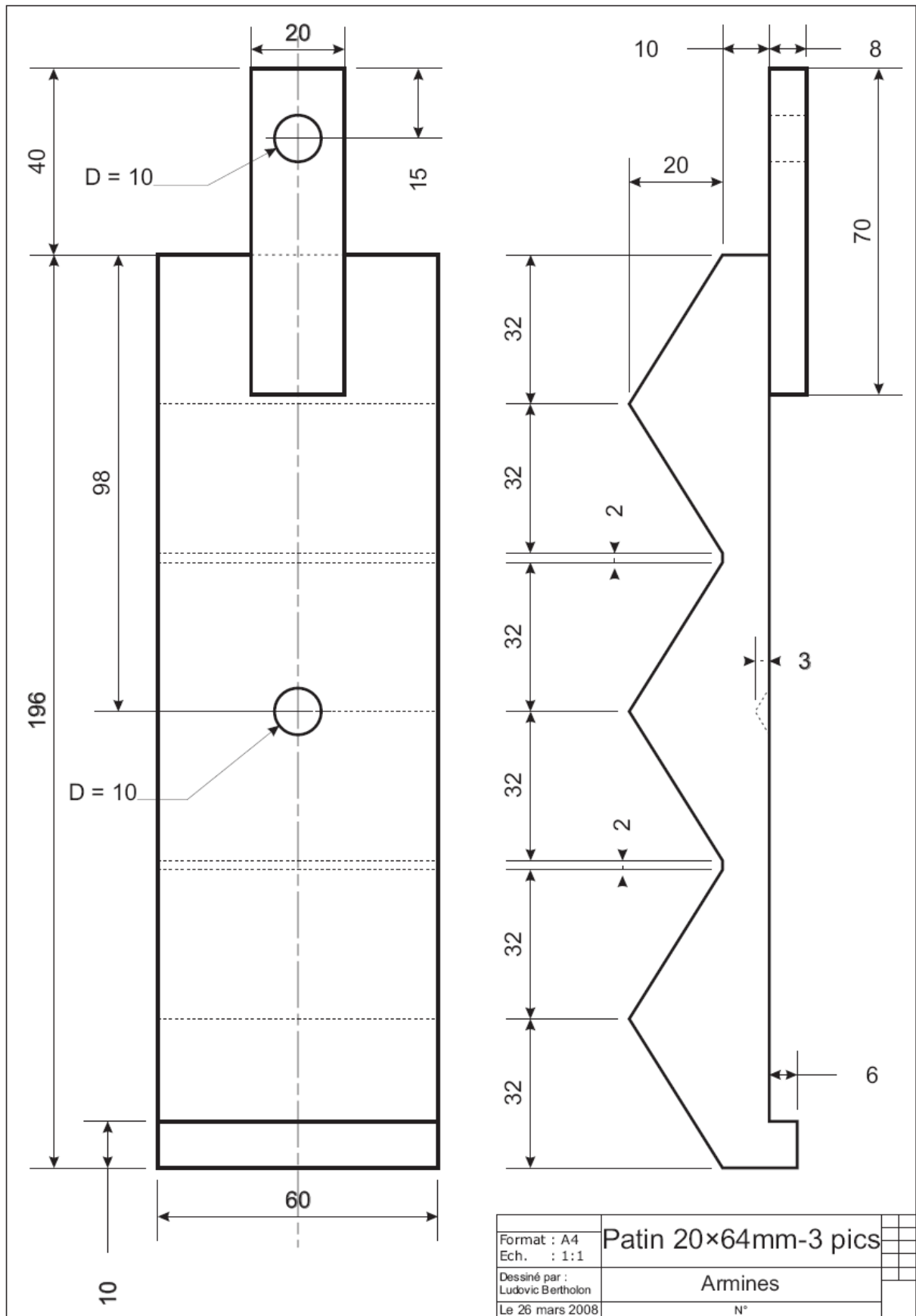


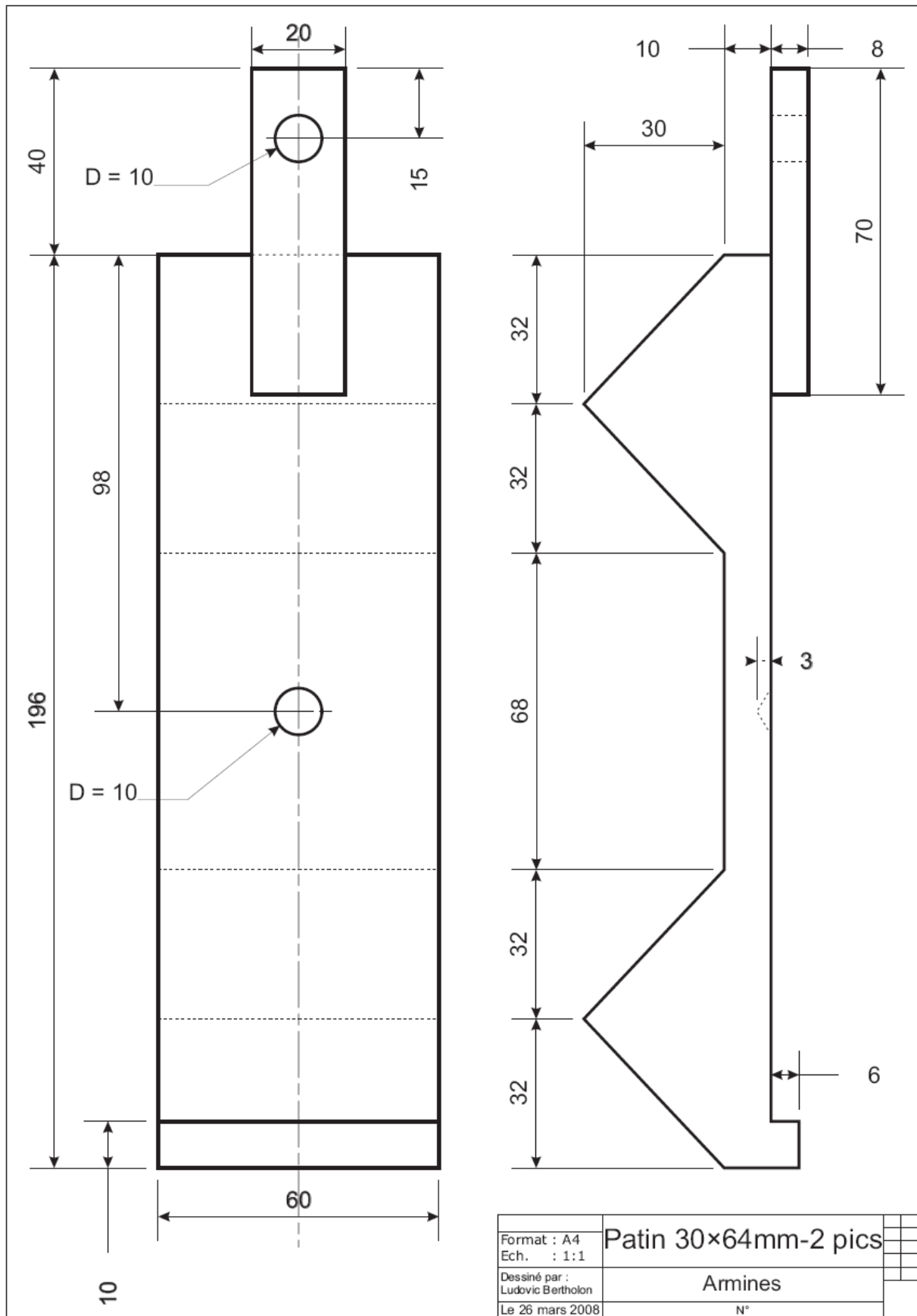






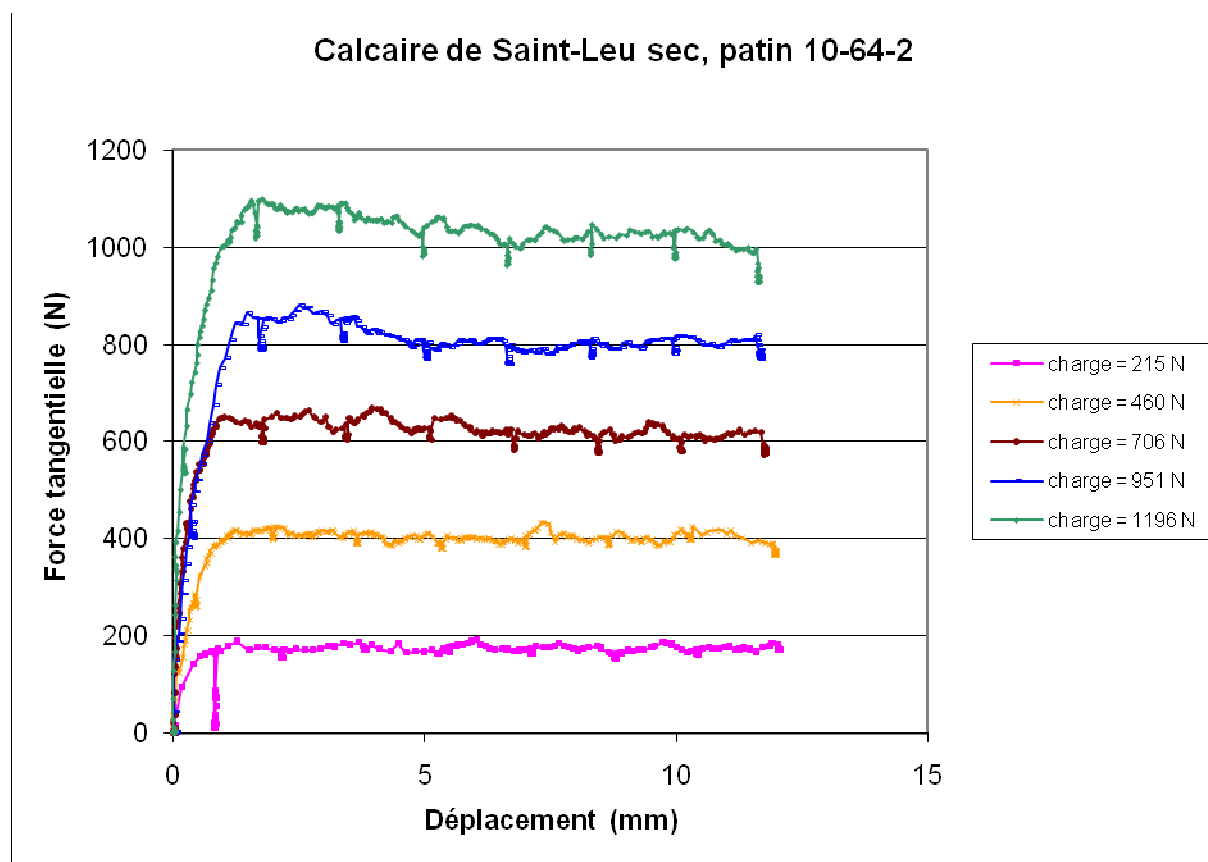


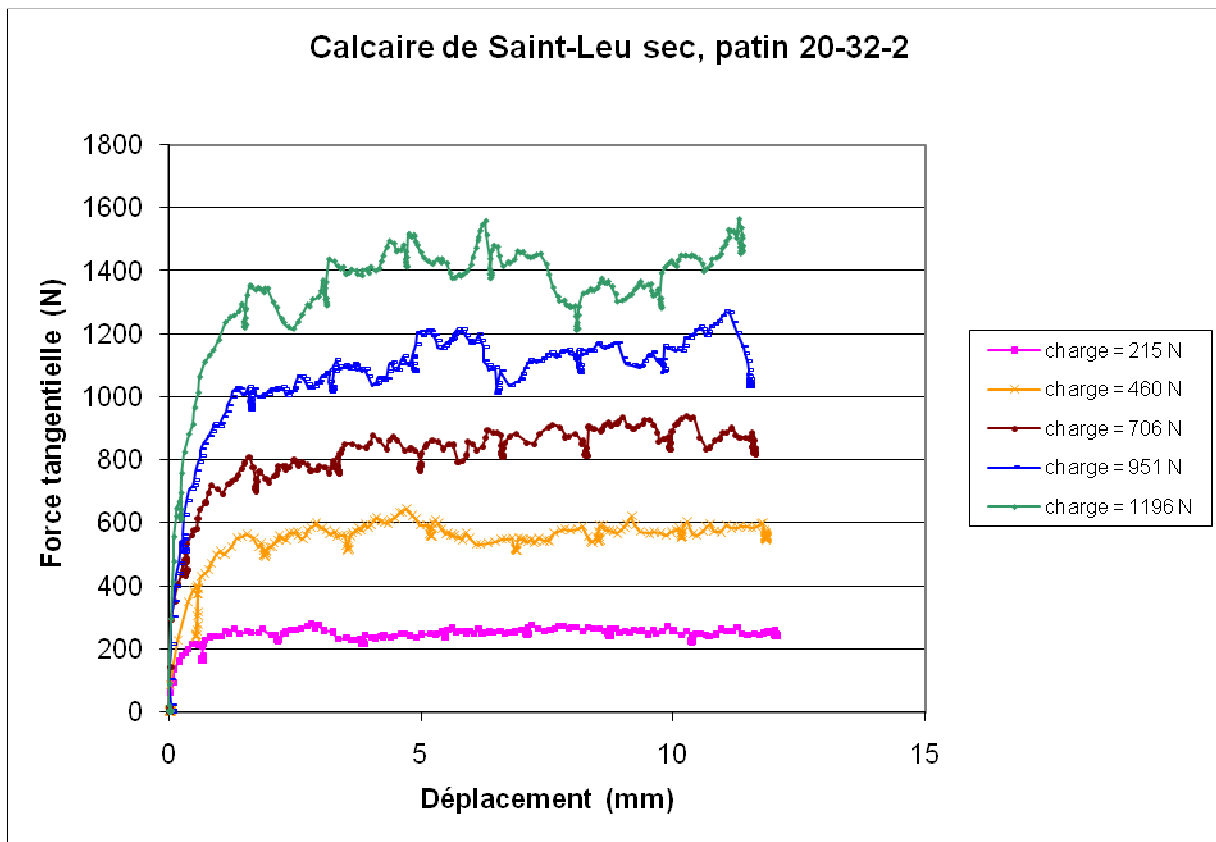
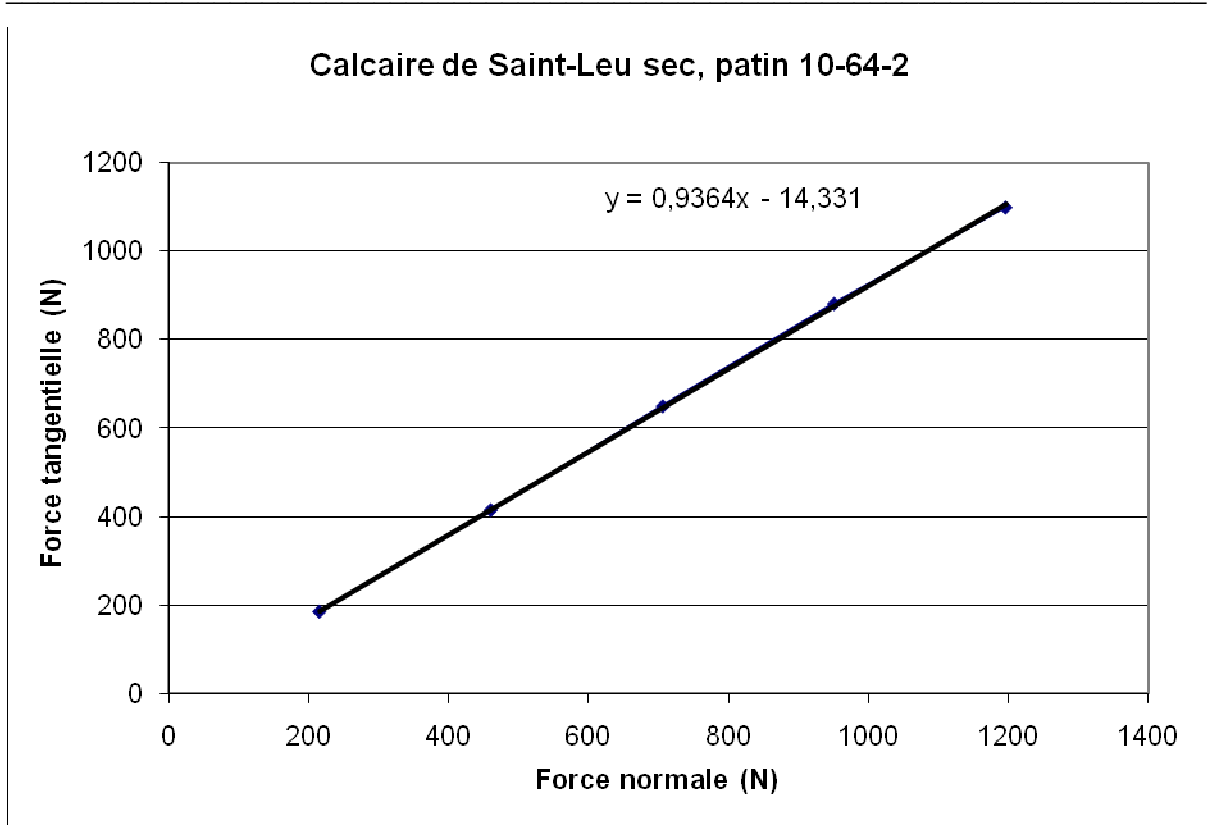


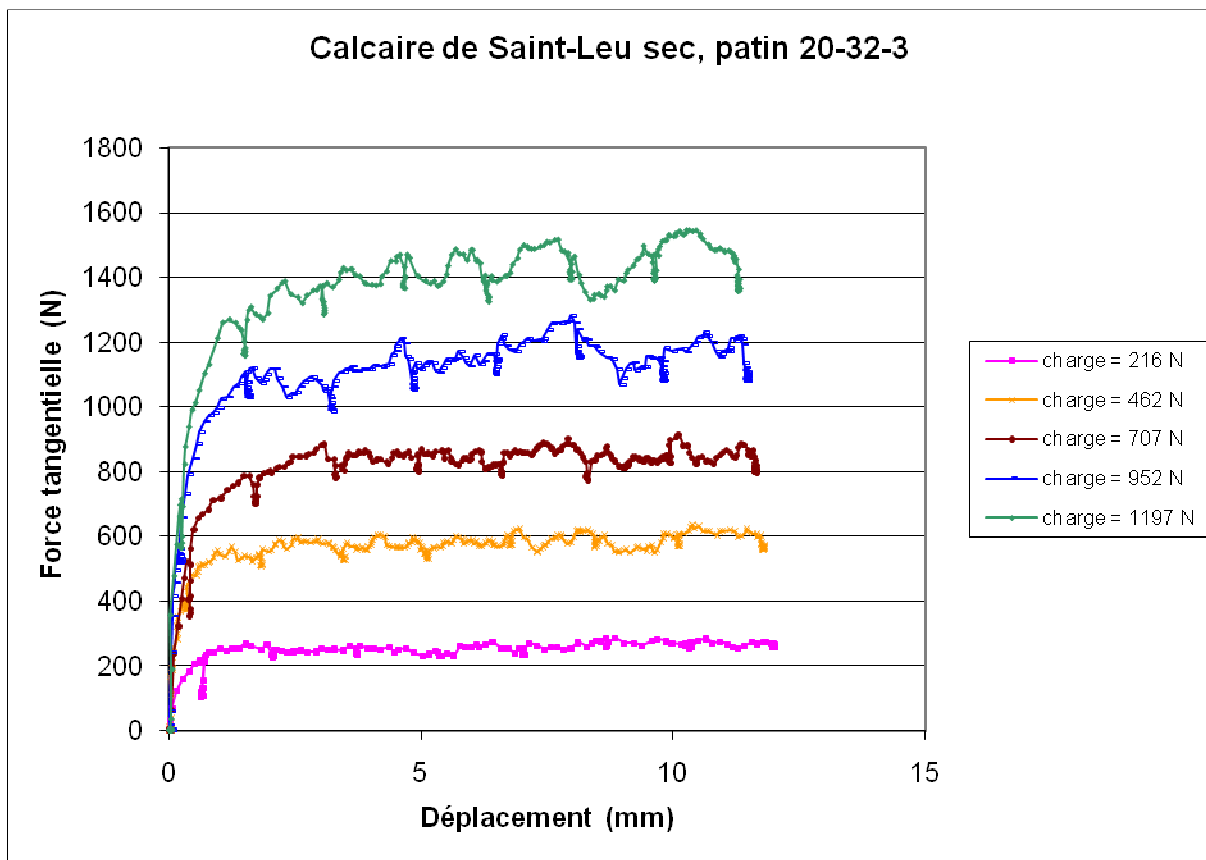
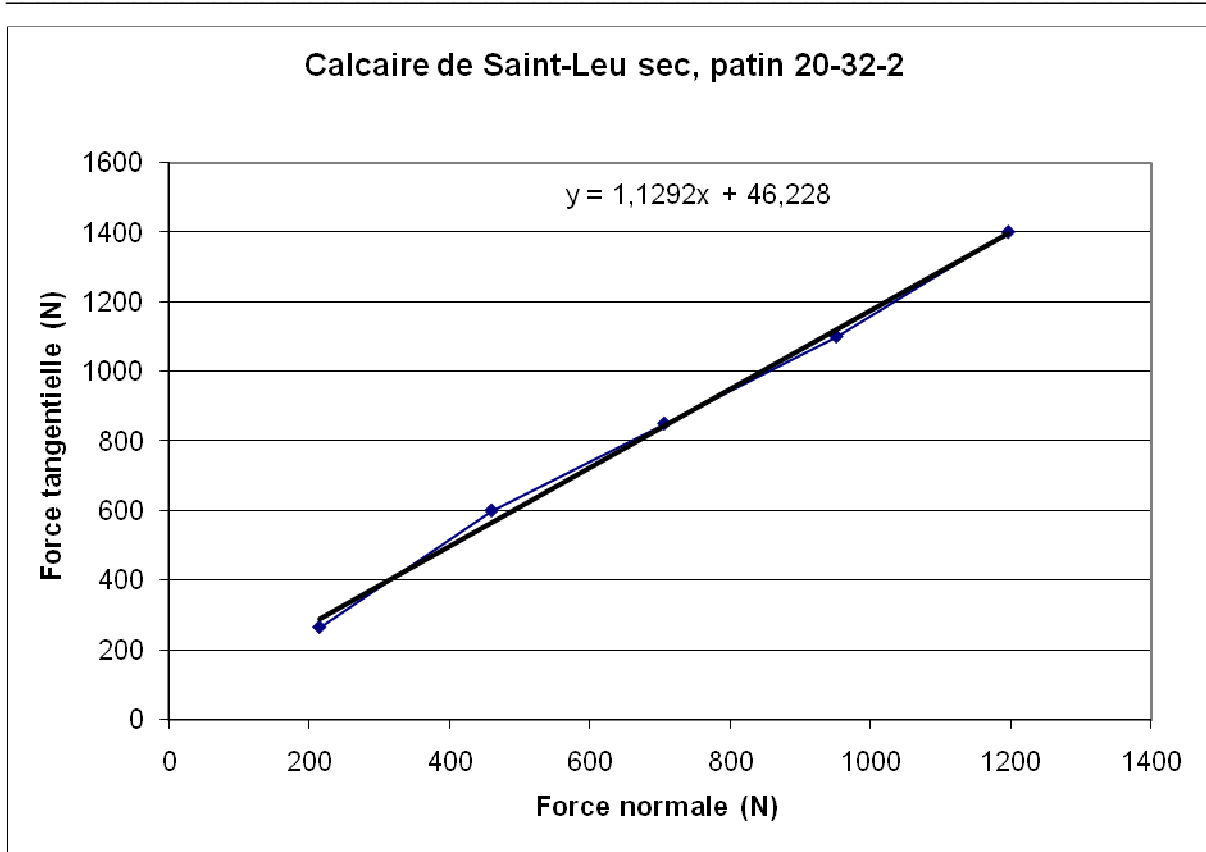


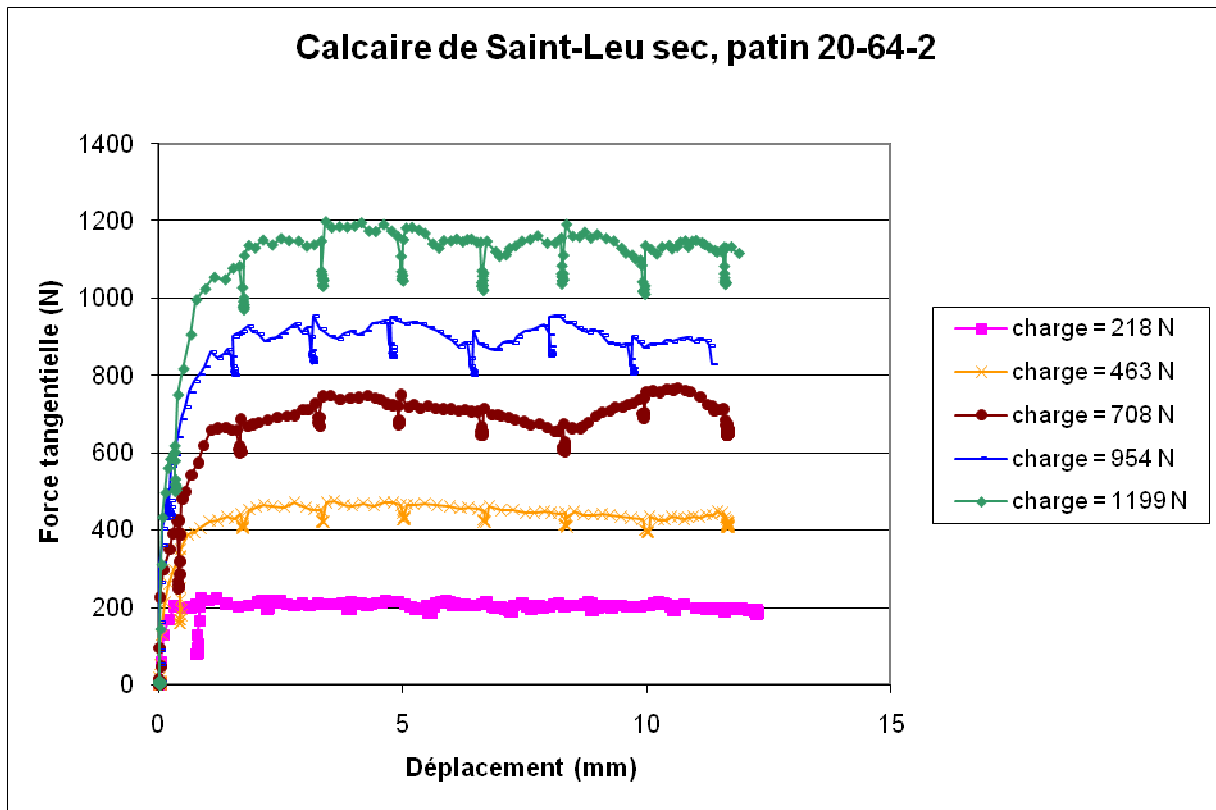
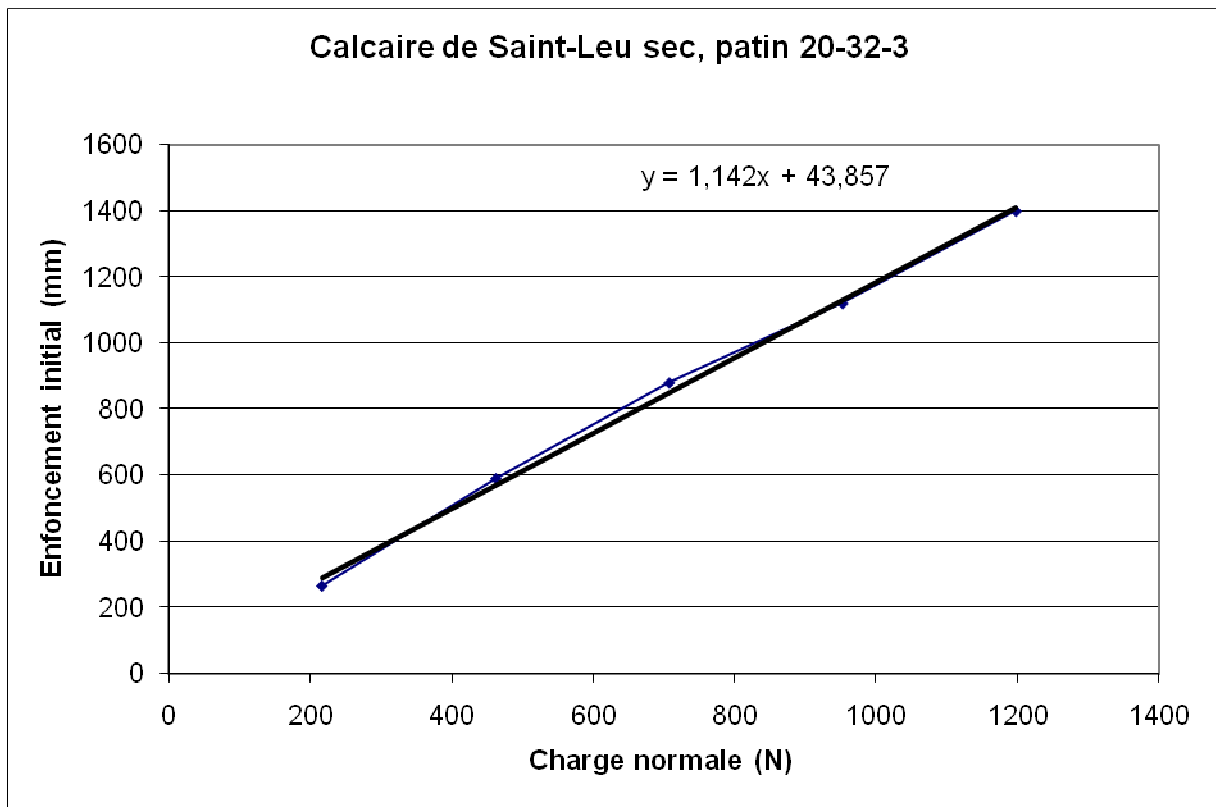
Annexe B : Essais réalisés sur le calcaire

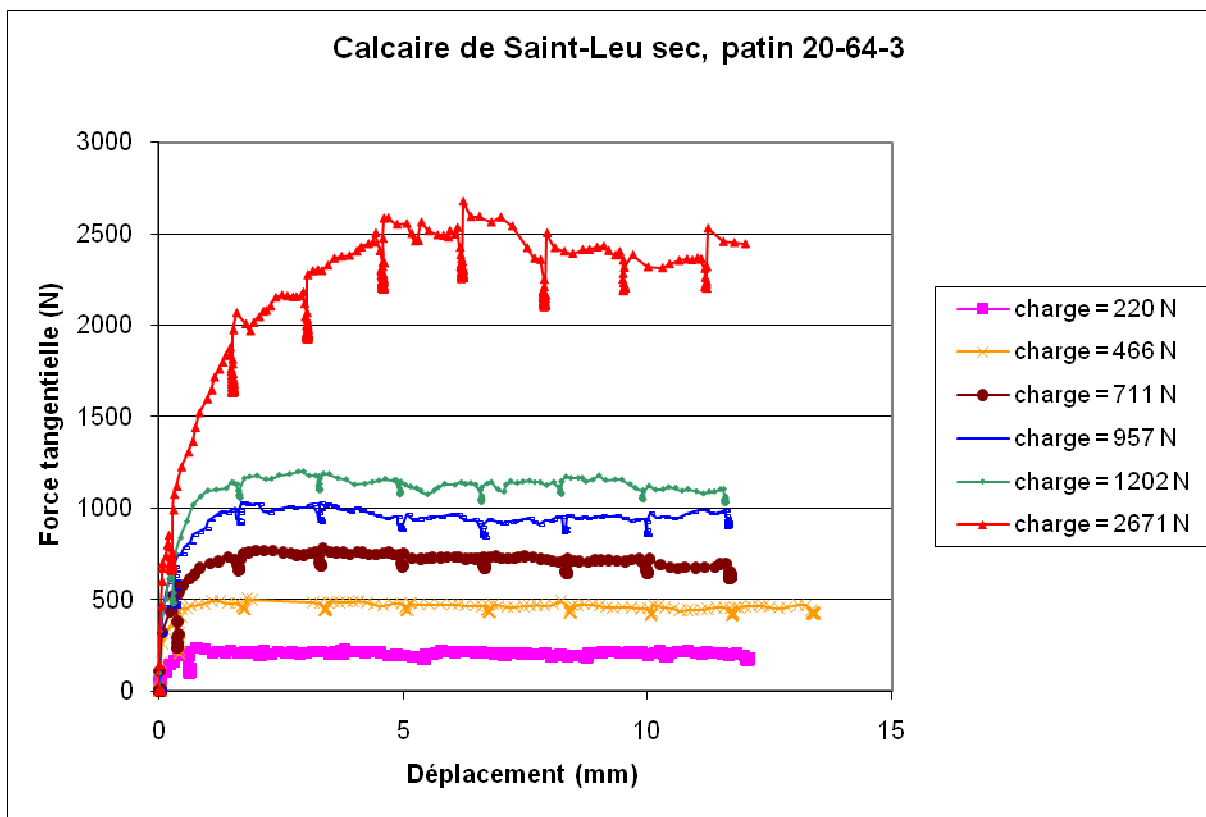
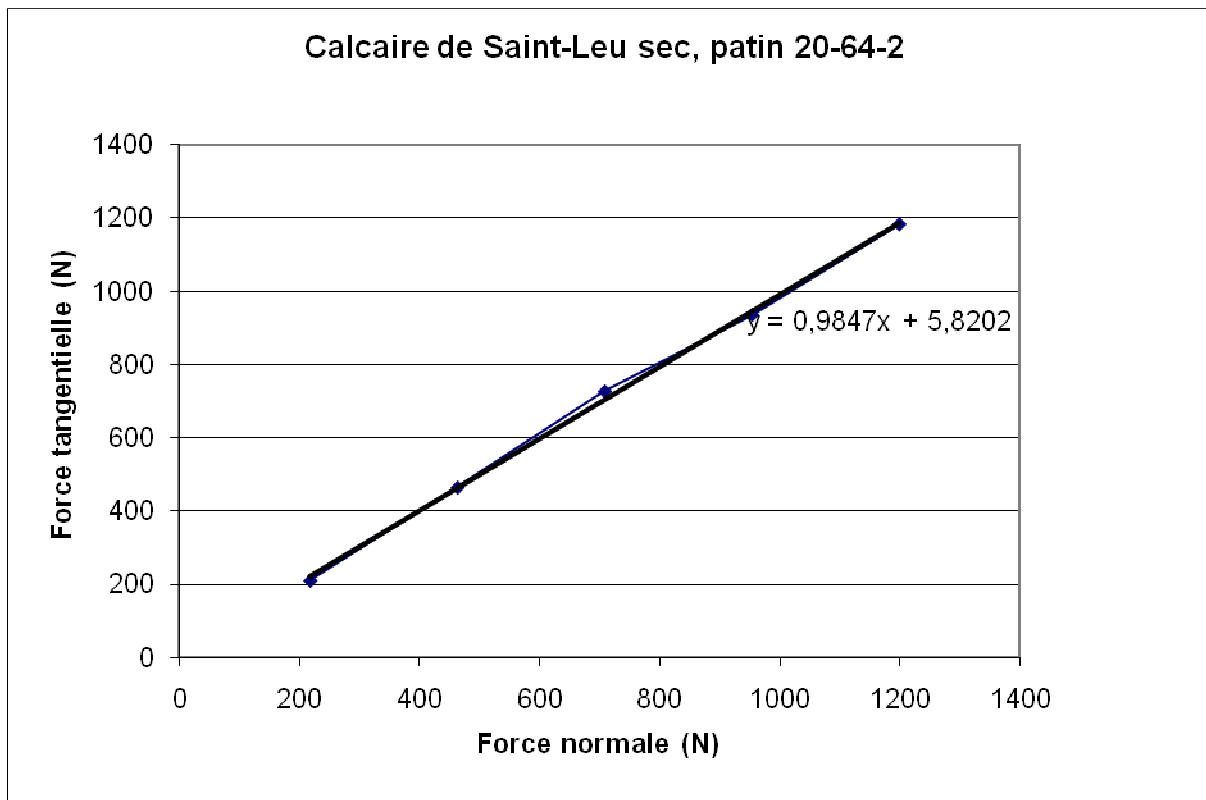
B-1 : Données des essais et calcul des coefficients

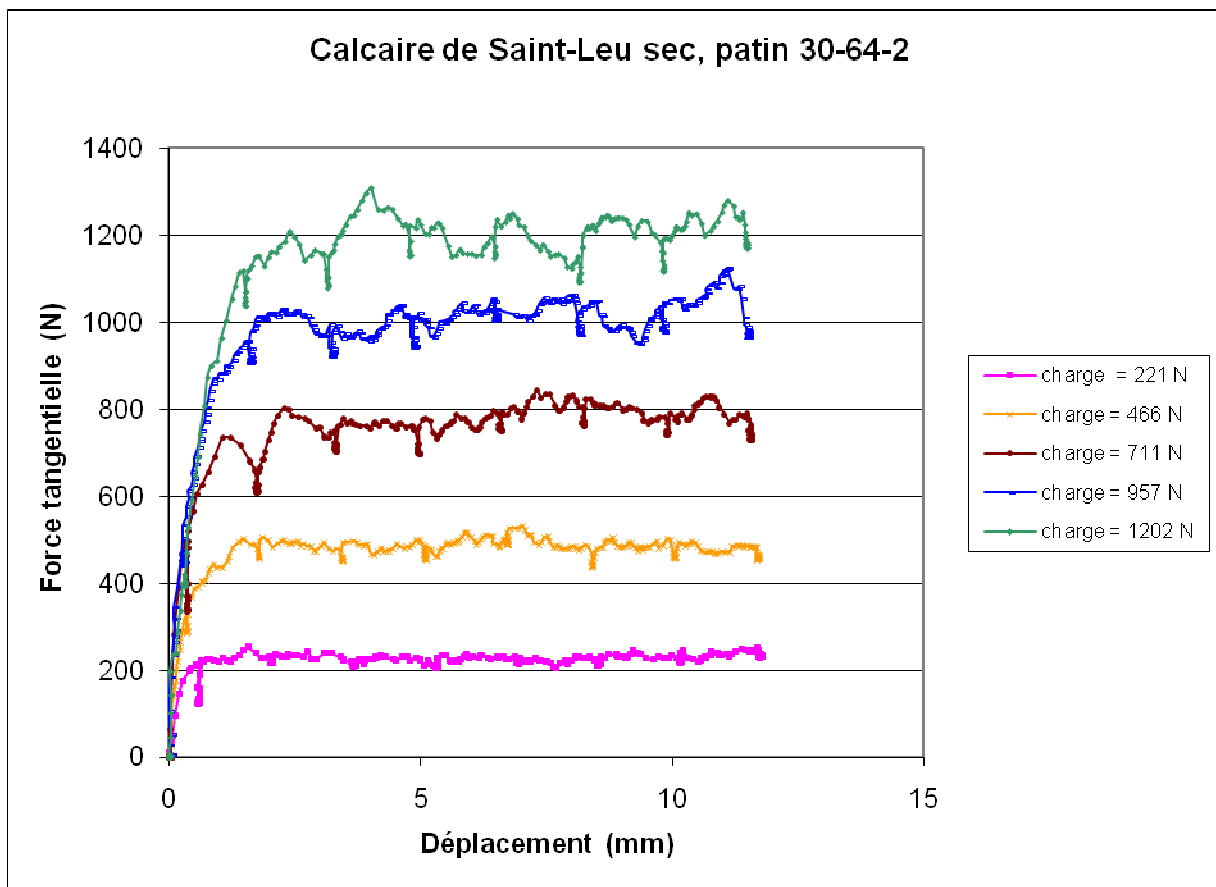
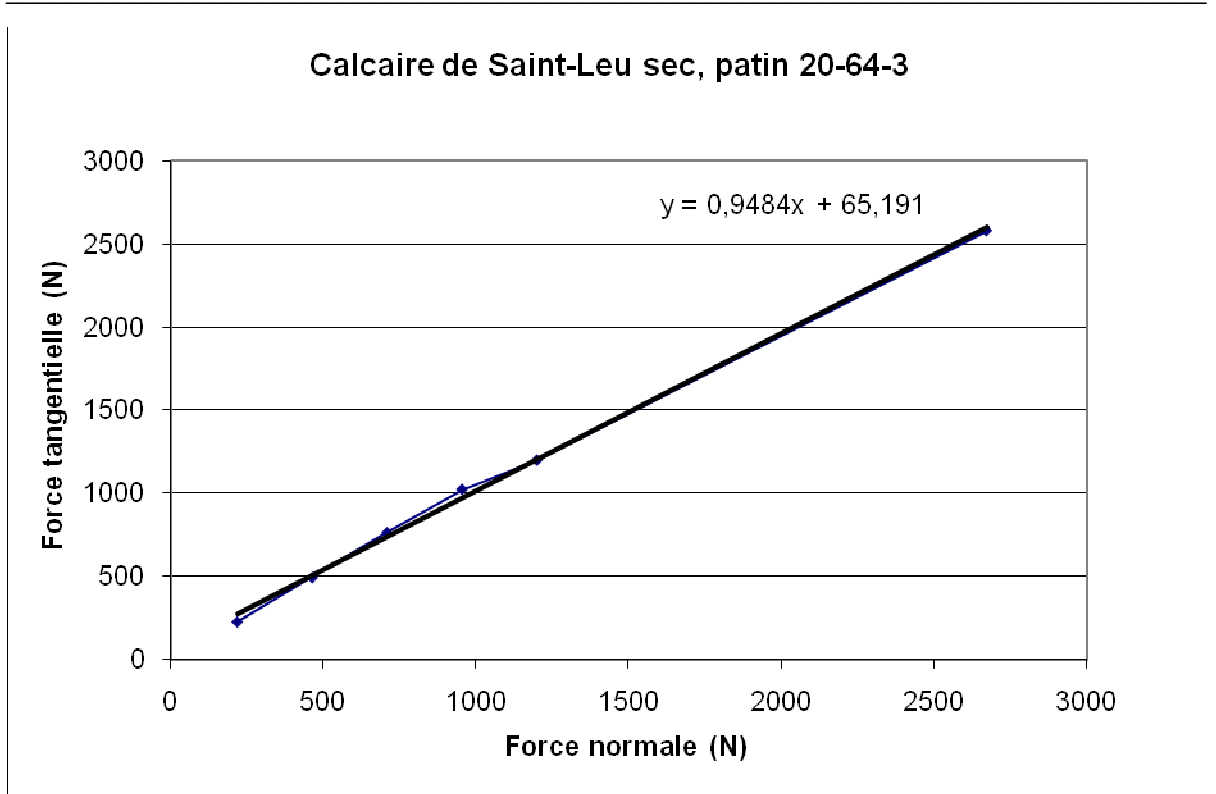


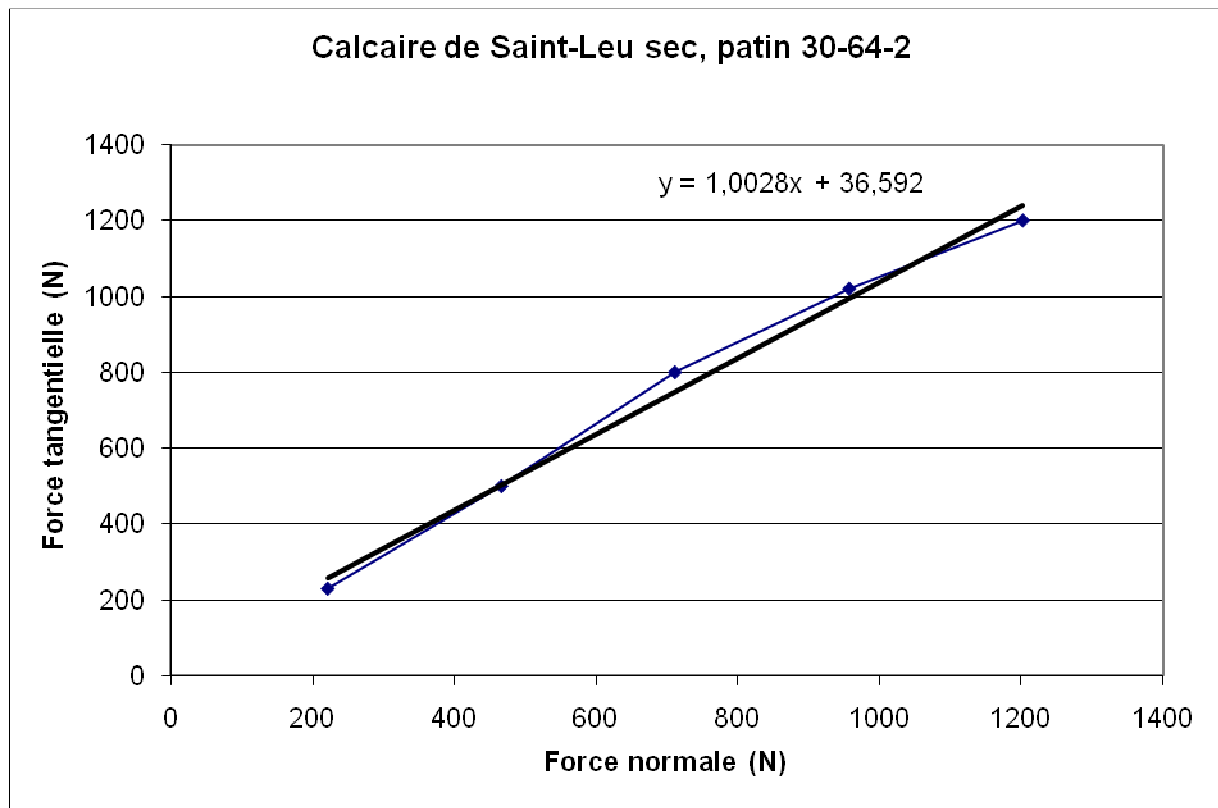


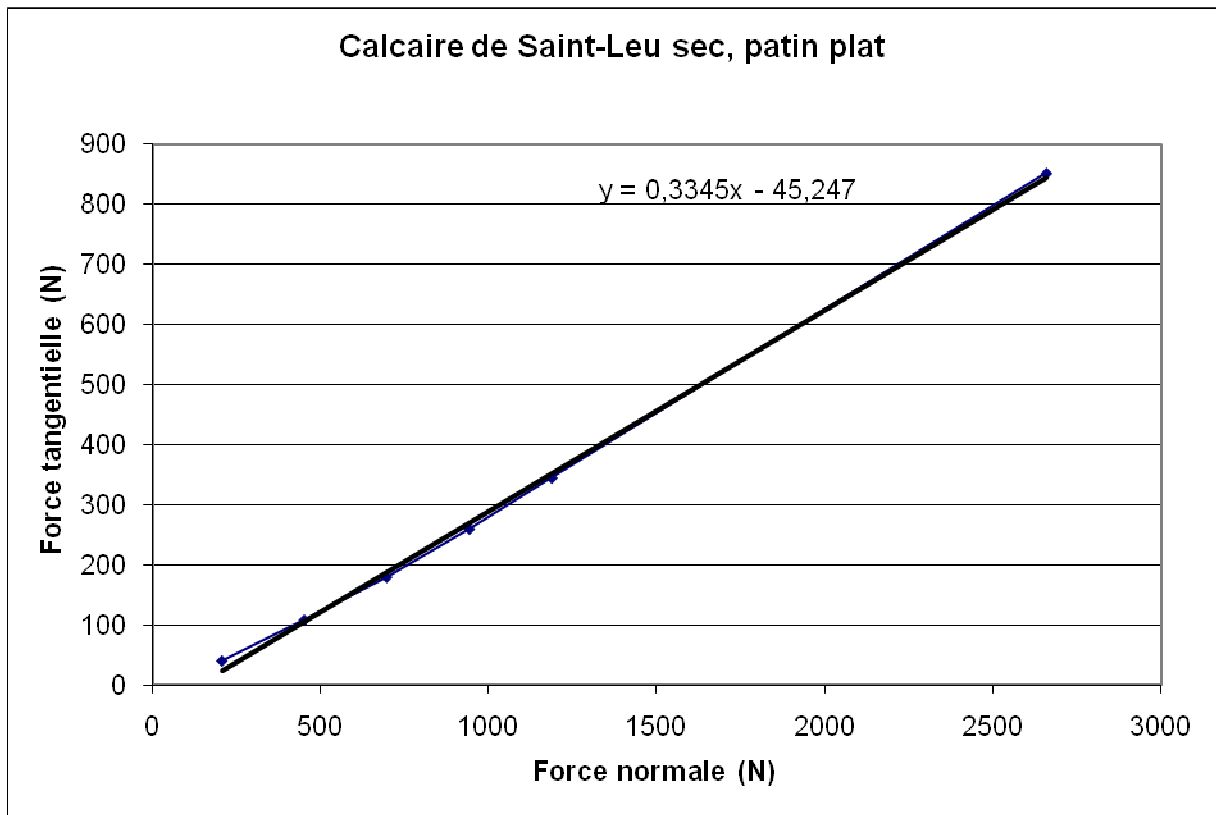
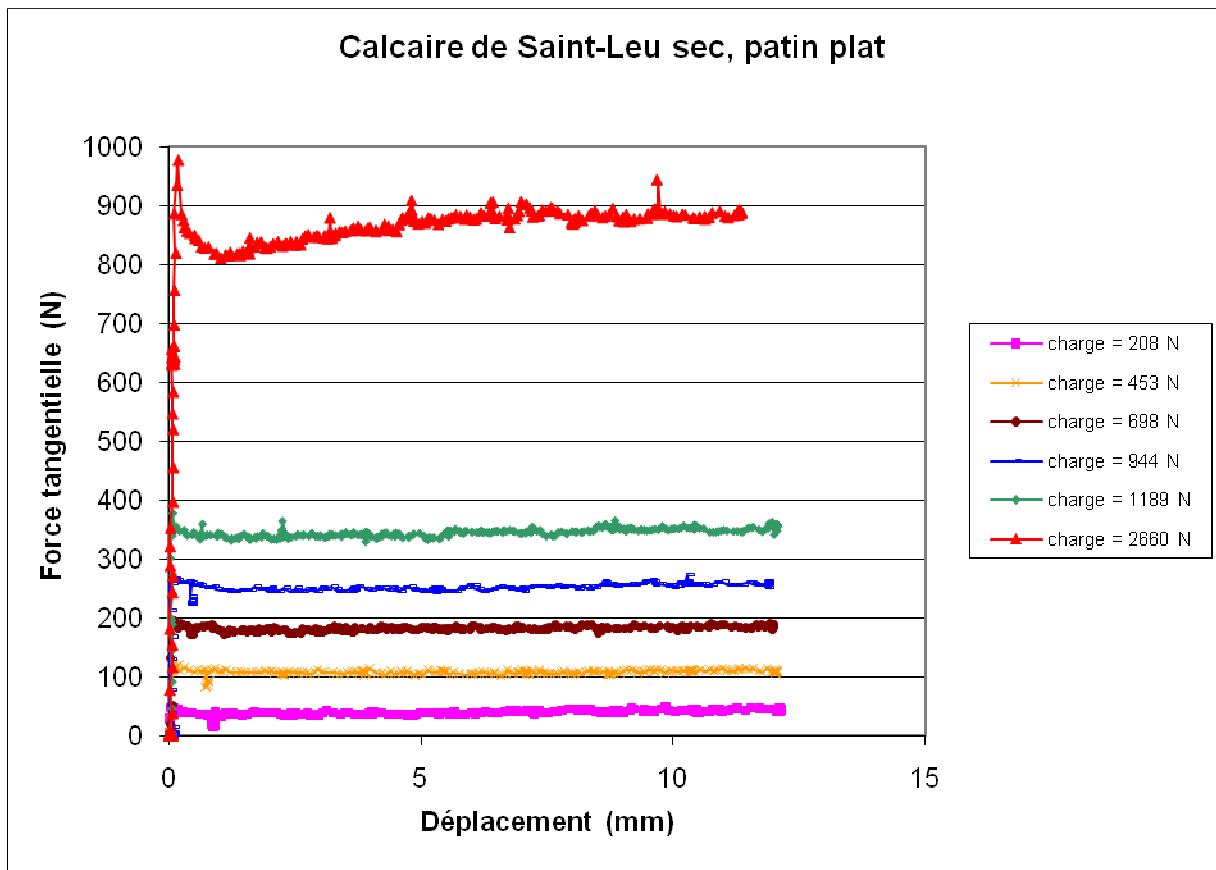




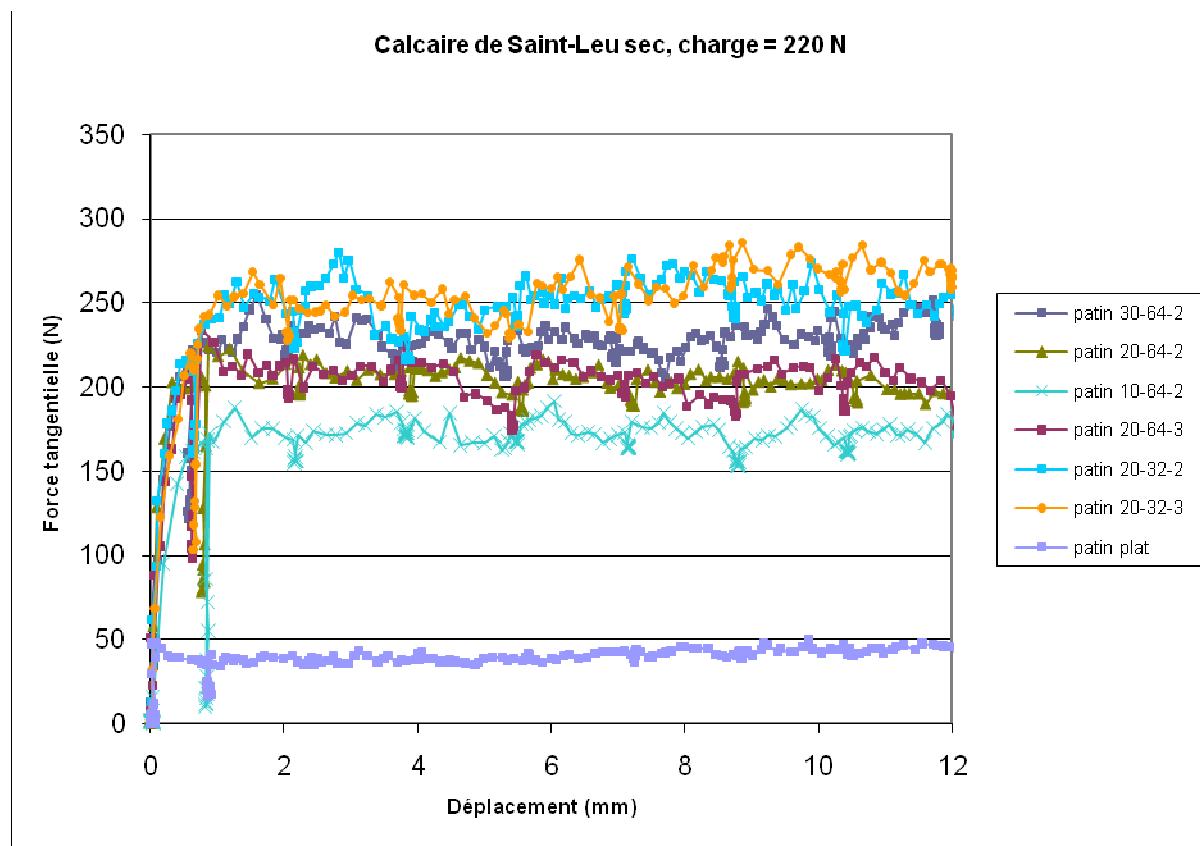


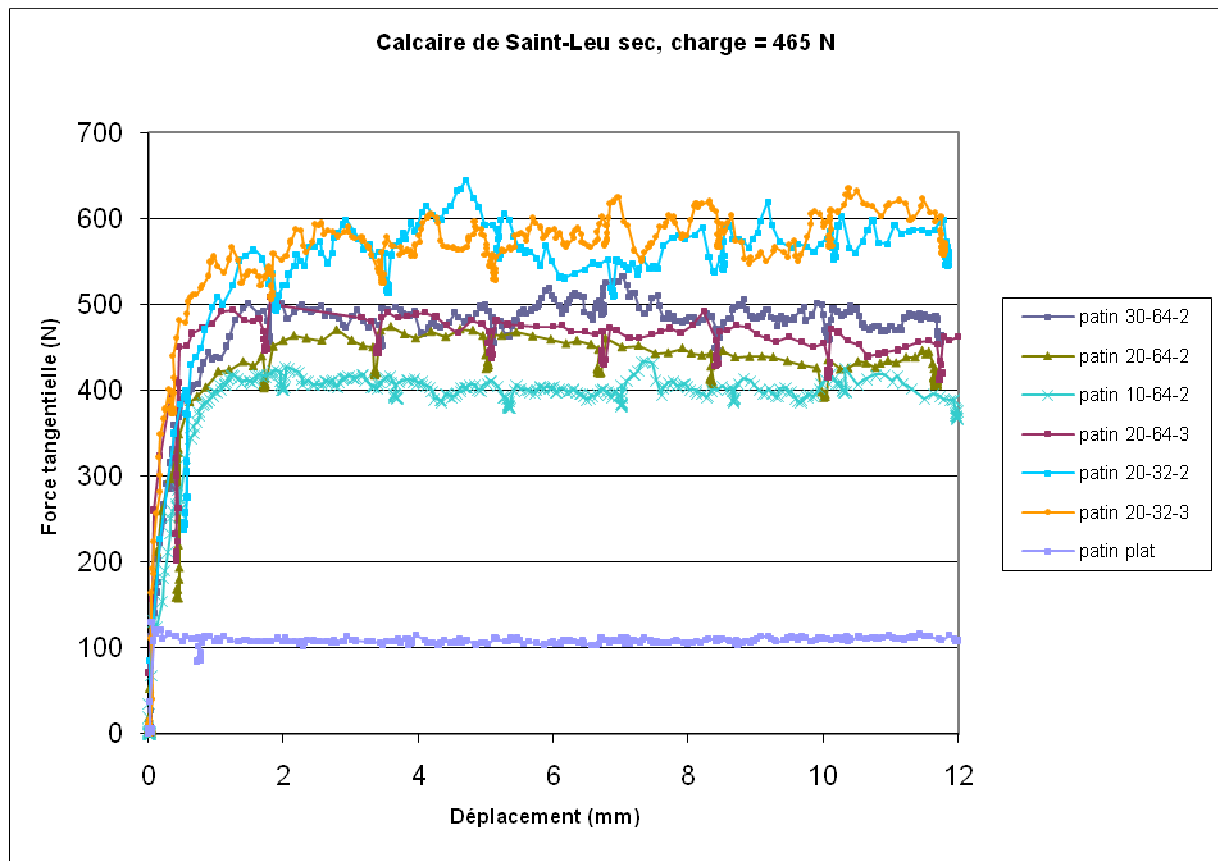


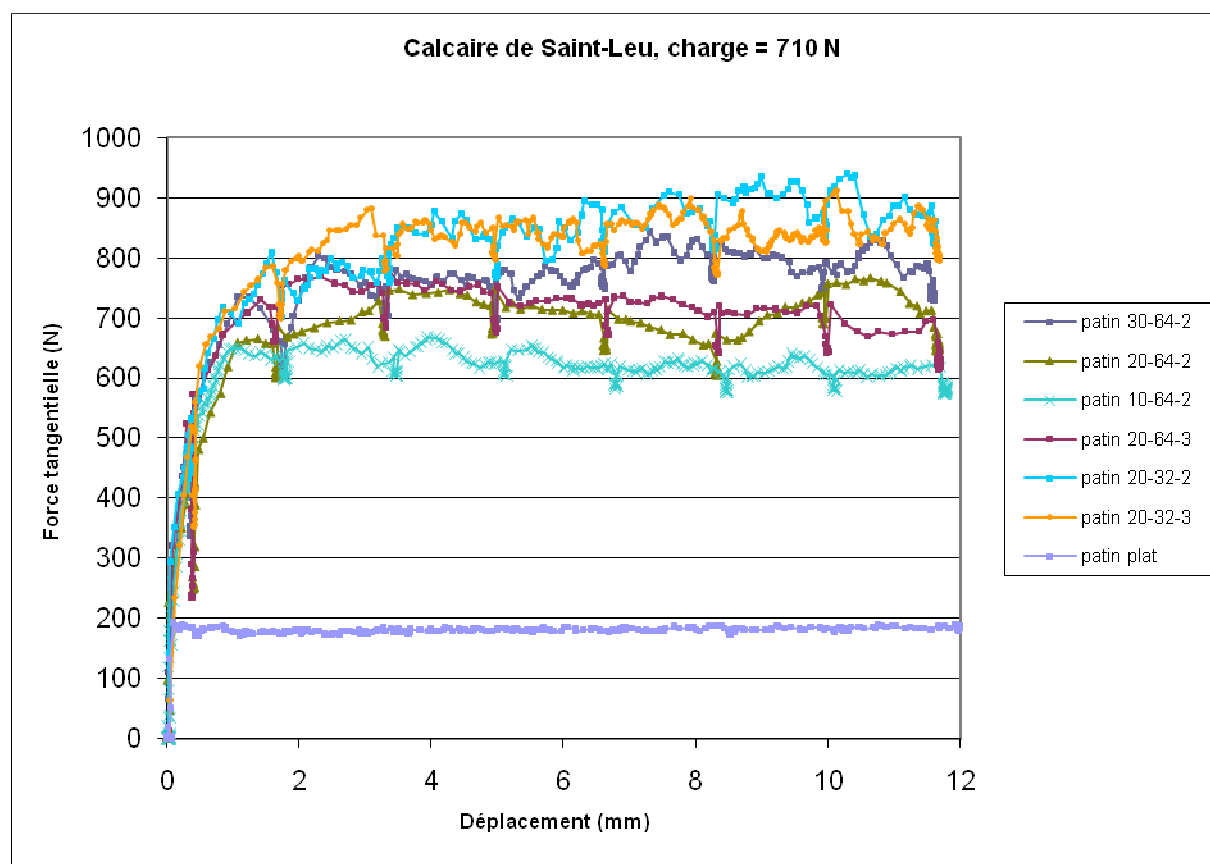


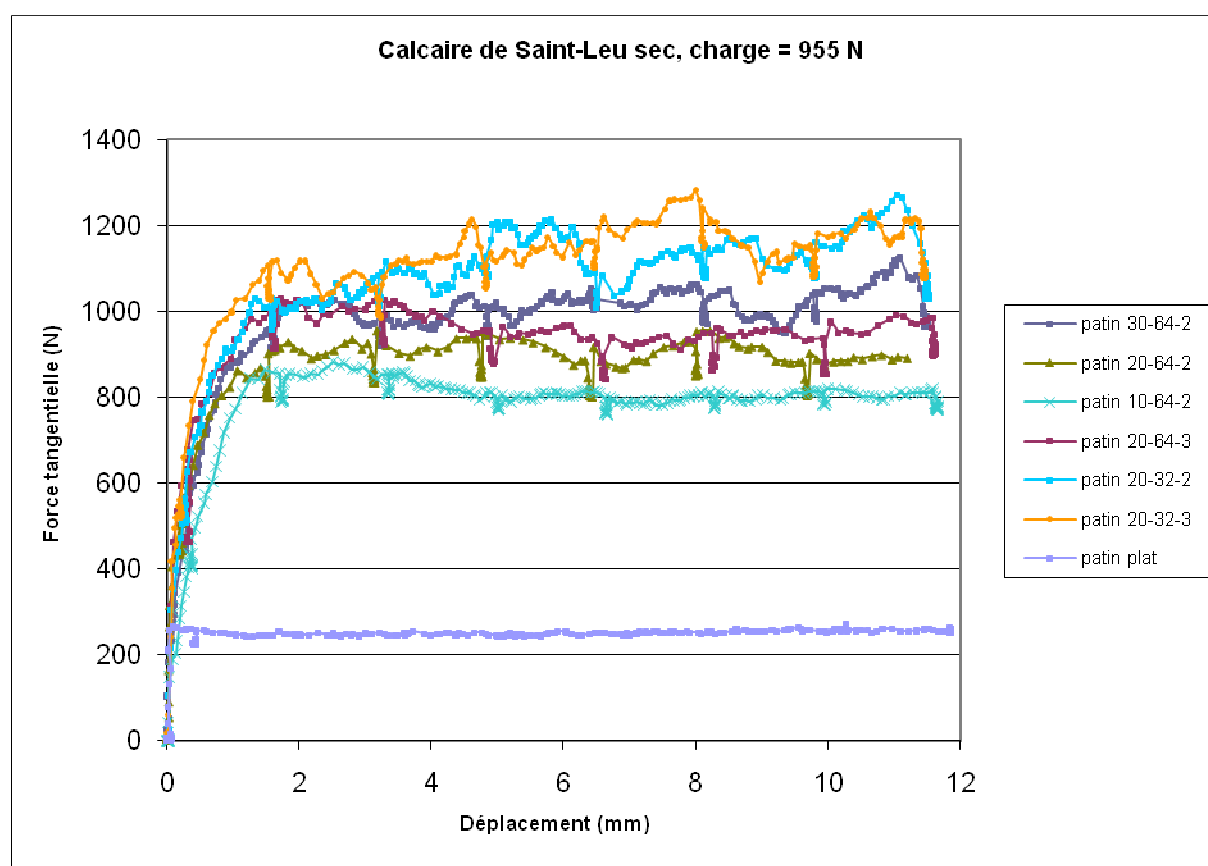


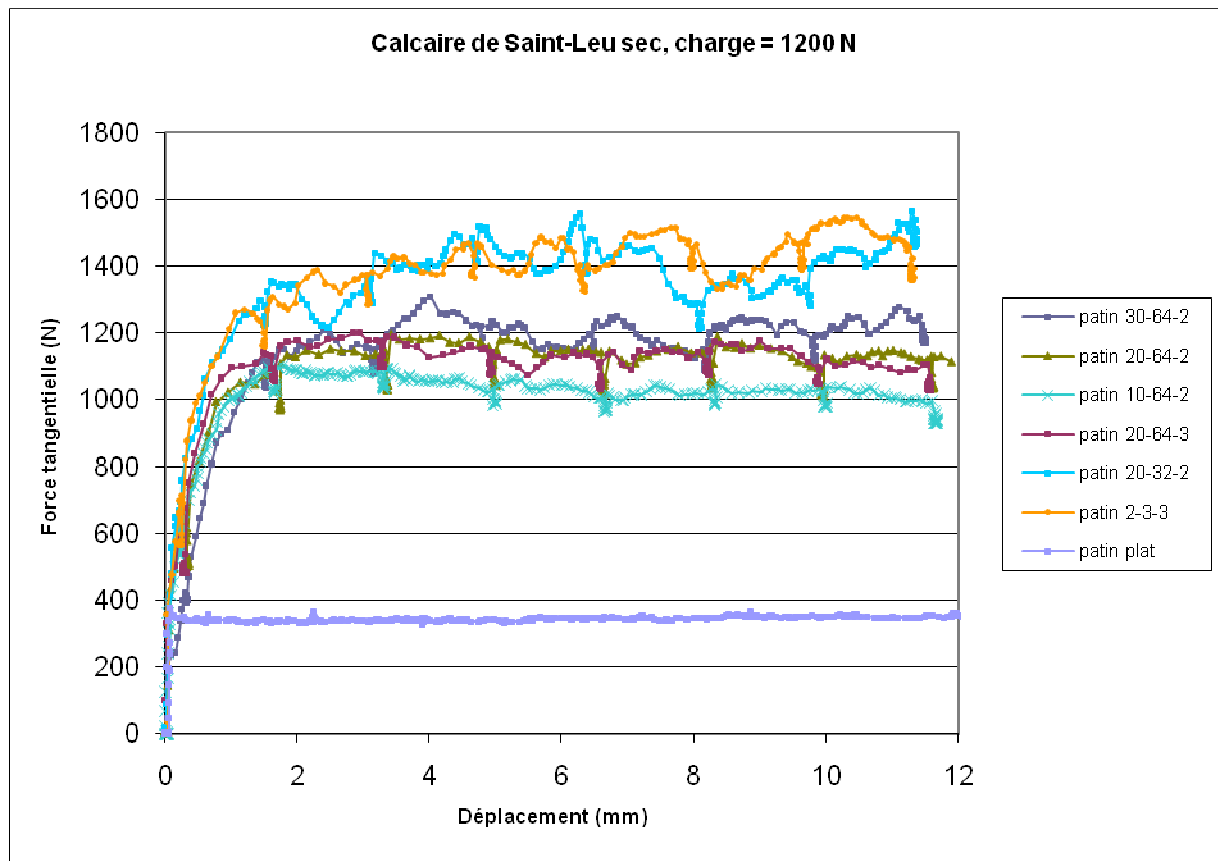
B-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée



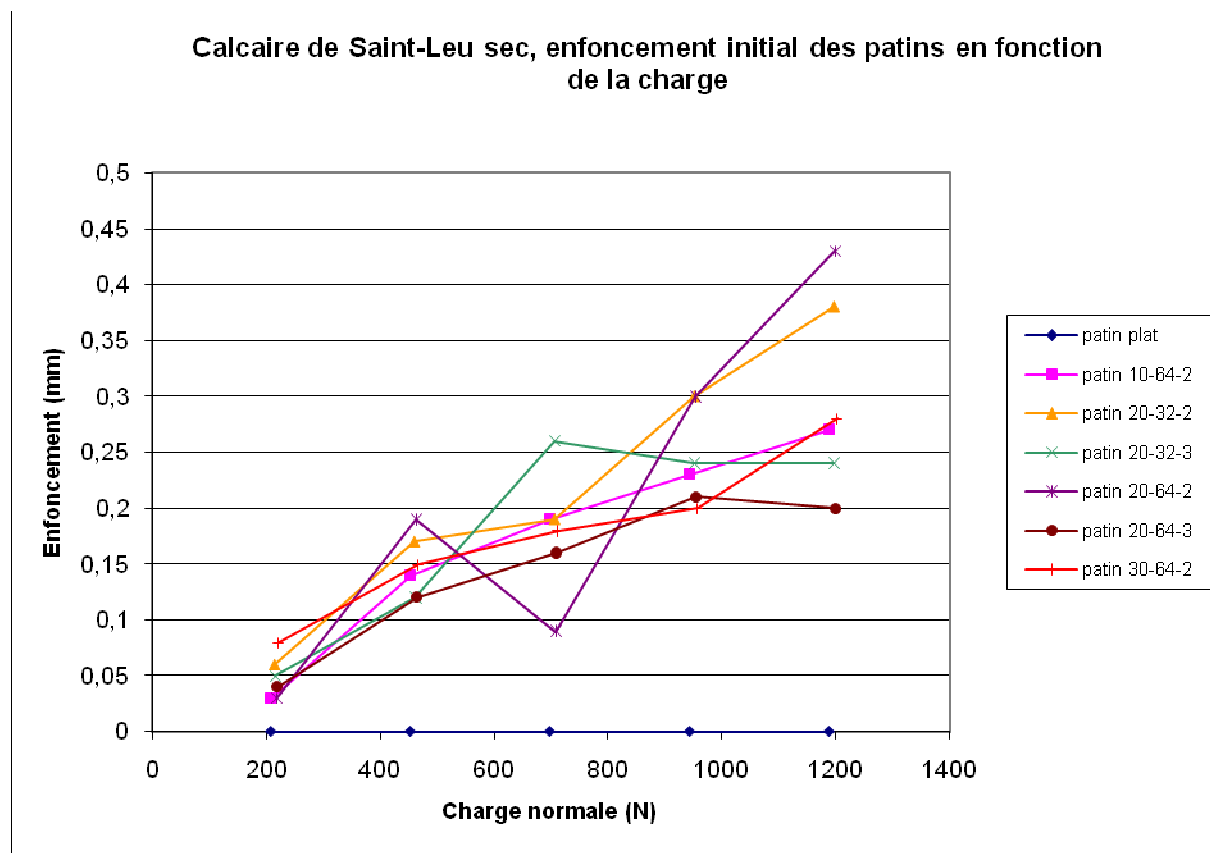




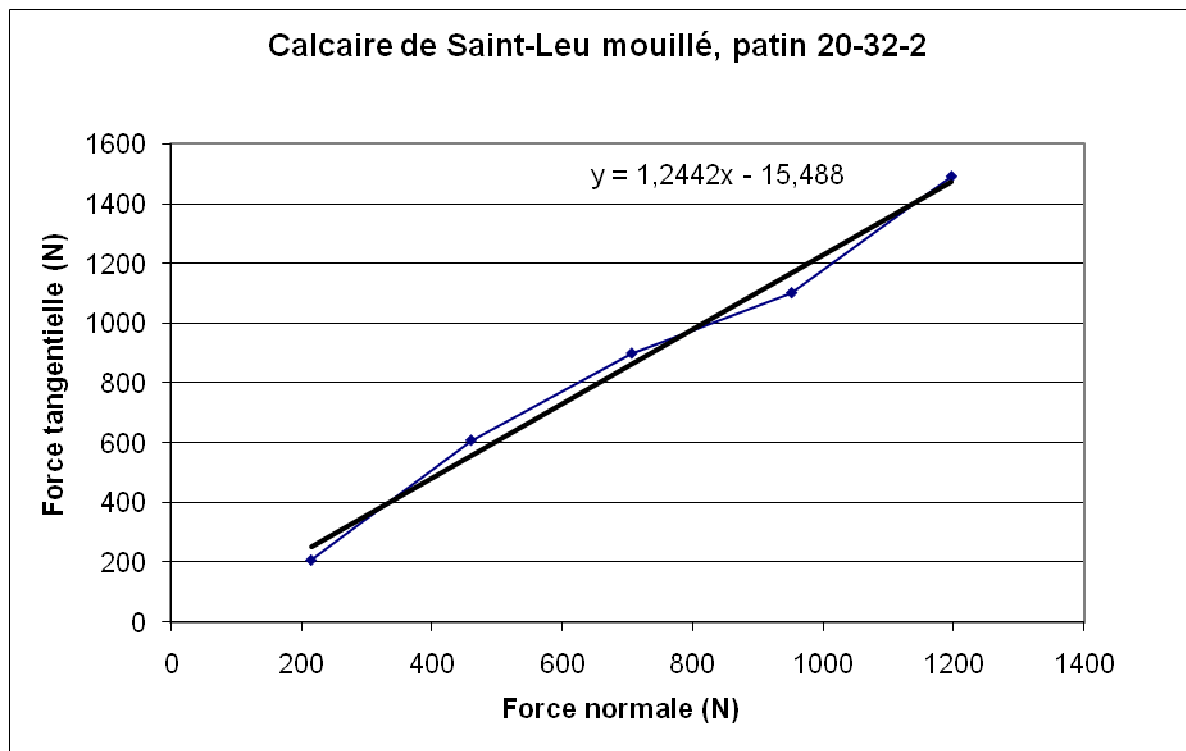
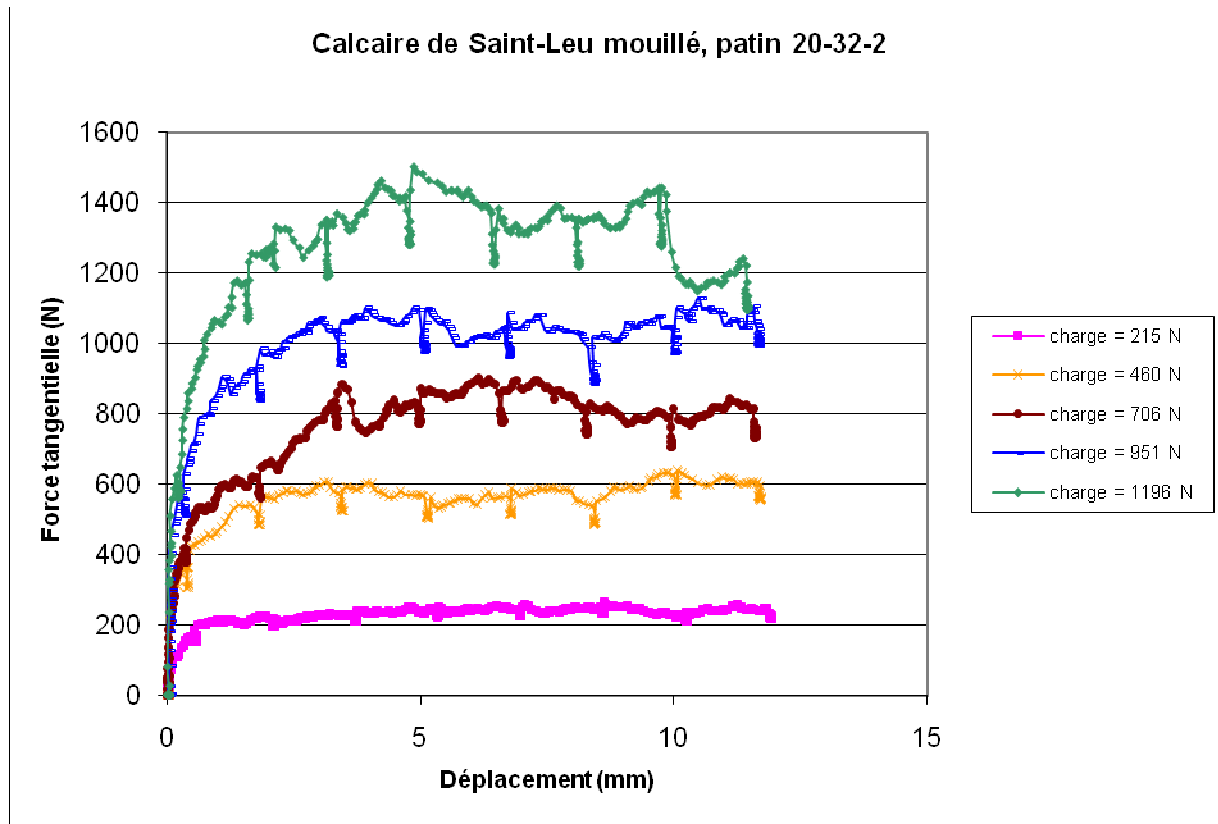


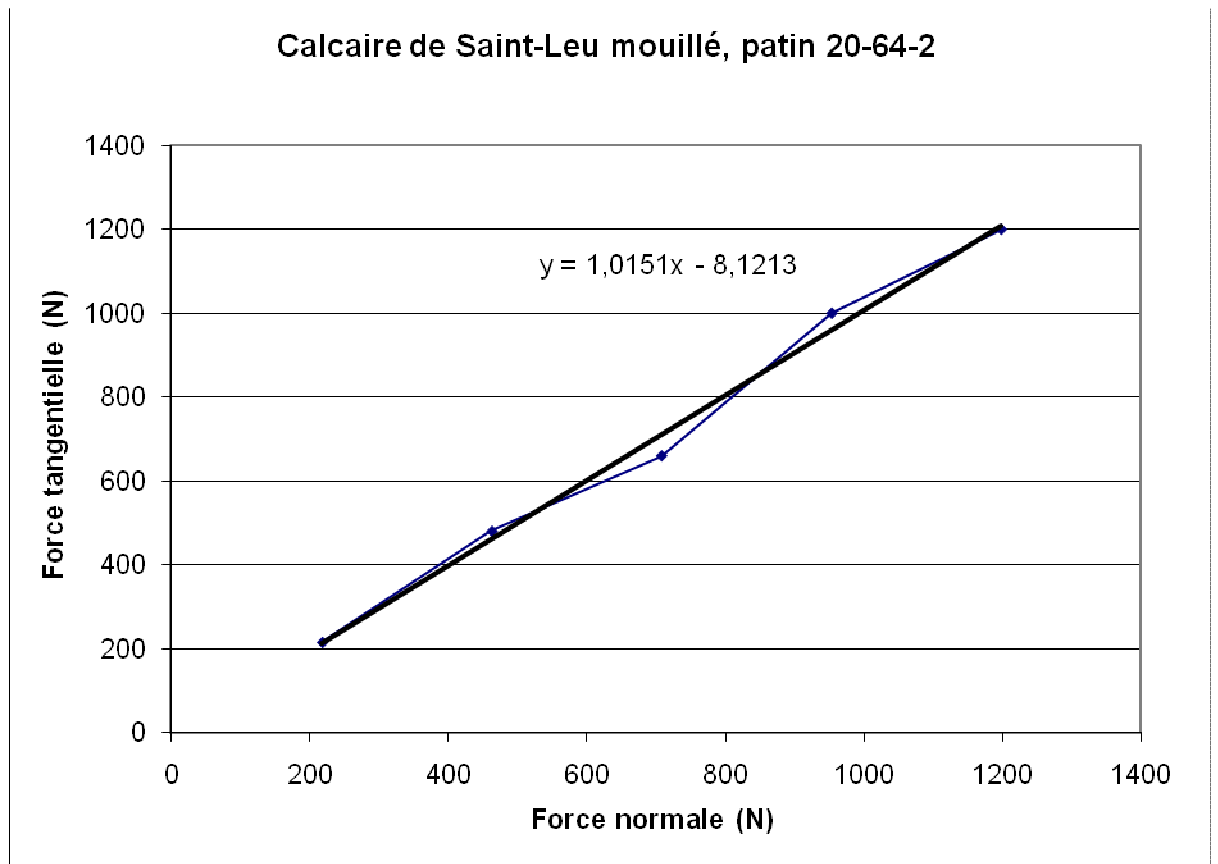
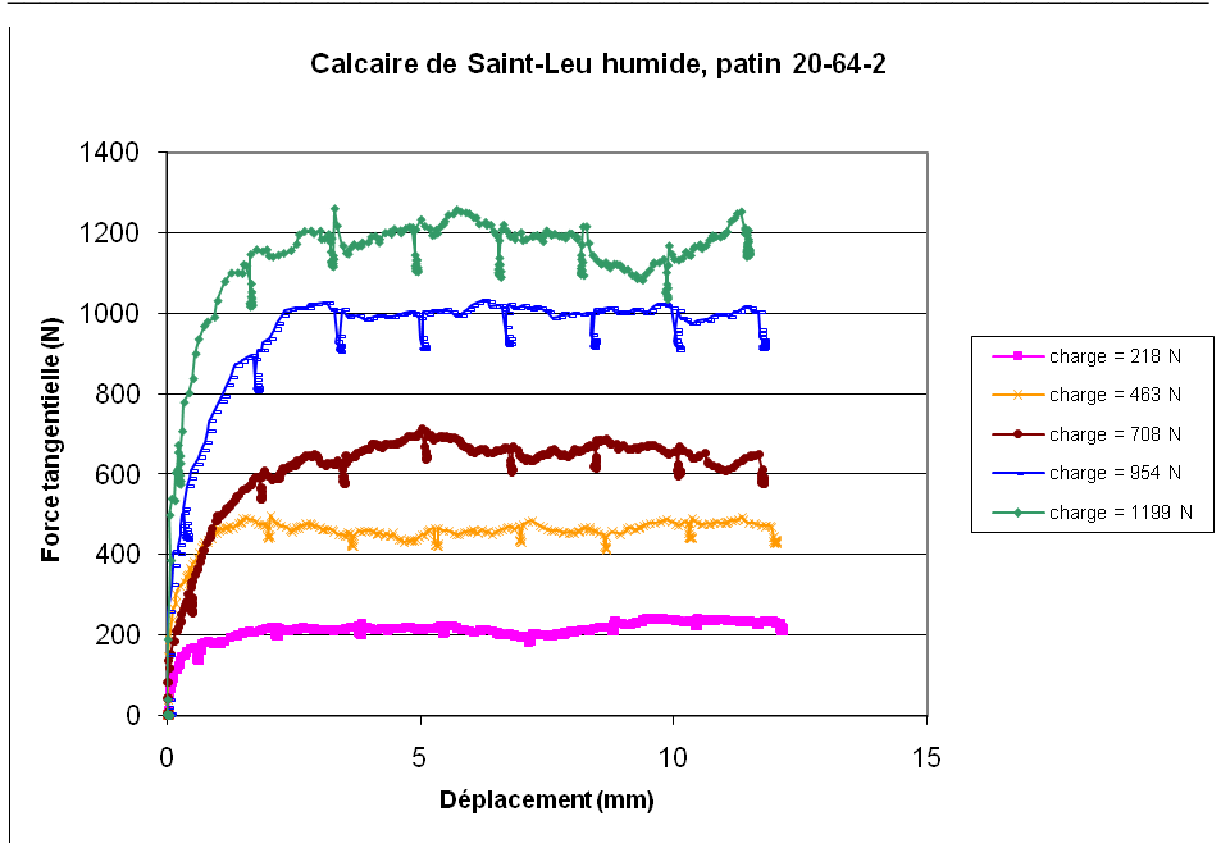


B-3 : Données d'enfoncement



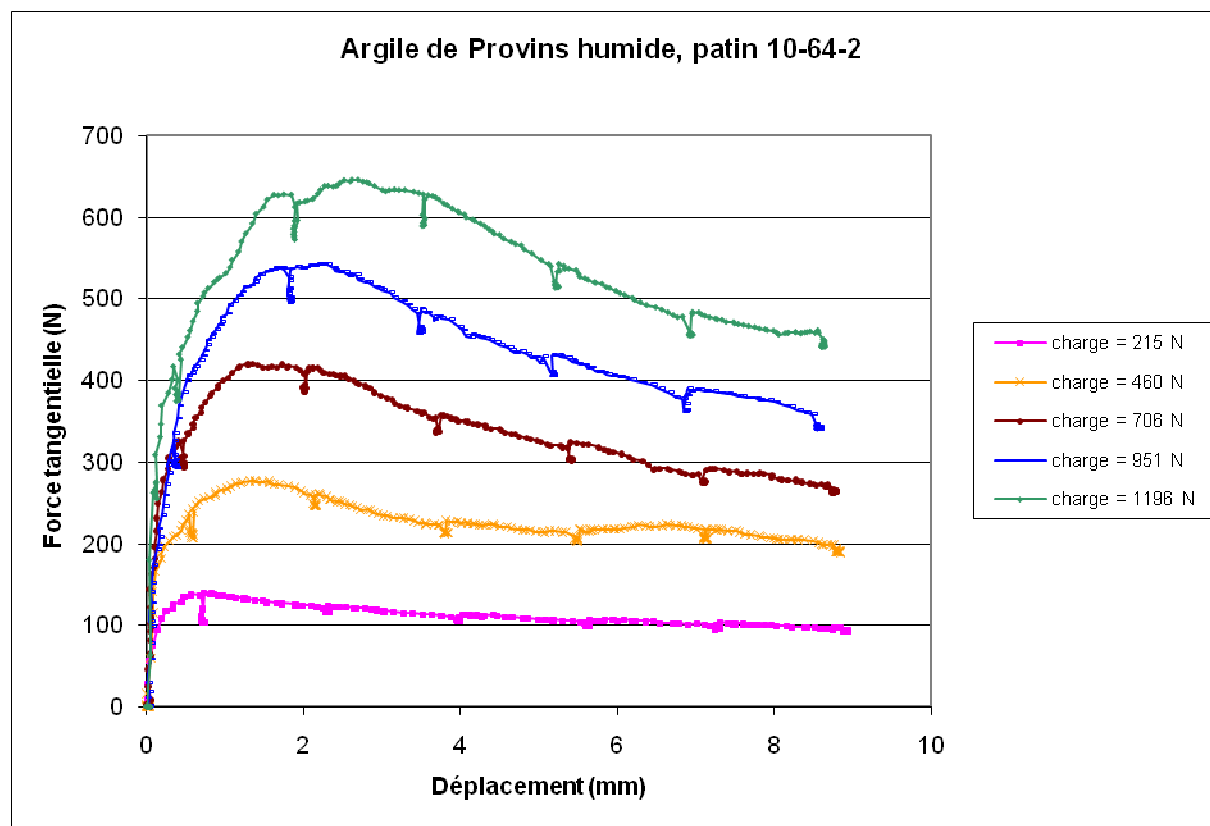
B-4 : Données des essais sur le calcaire mouillé

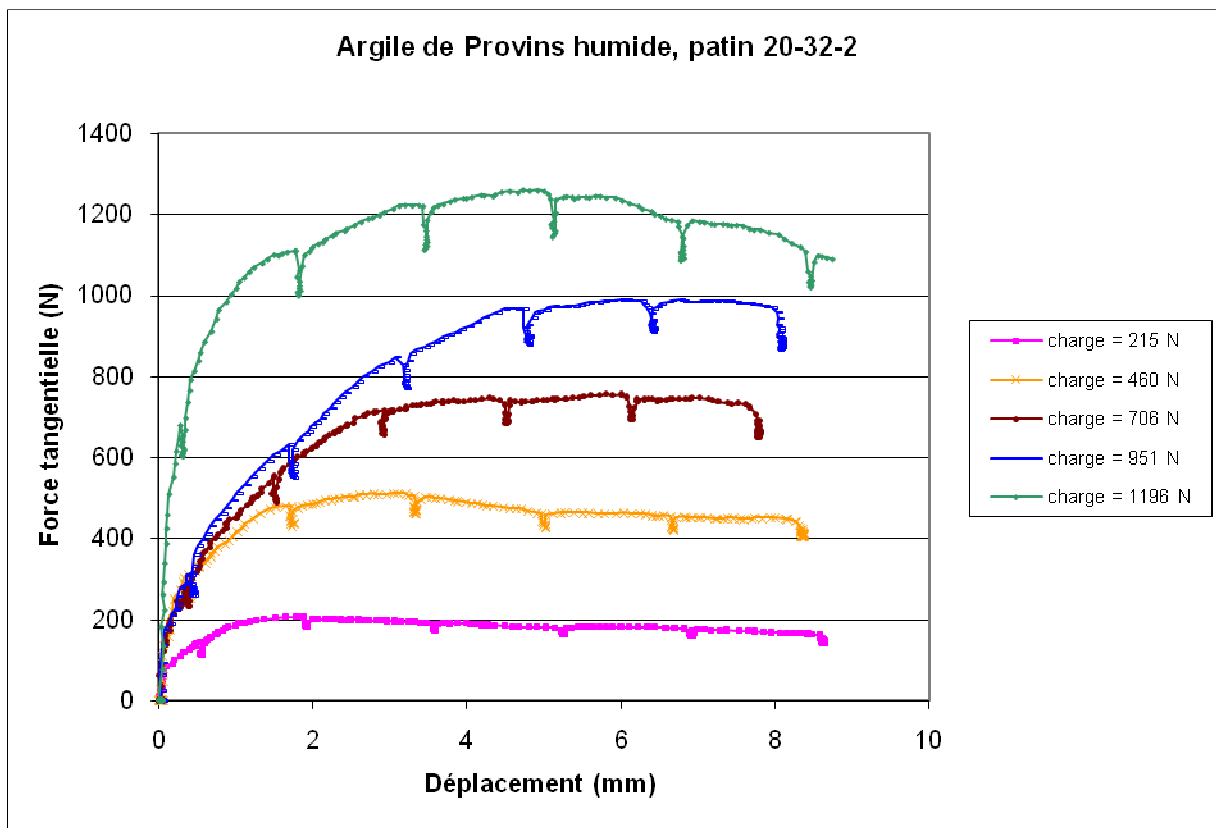
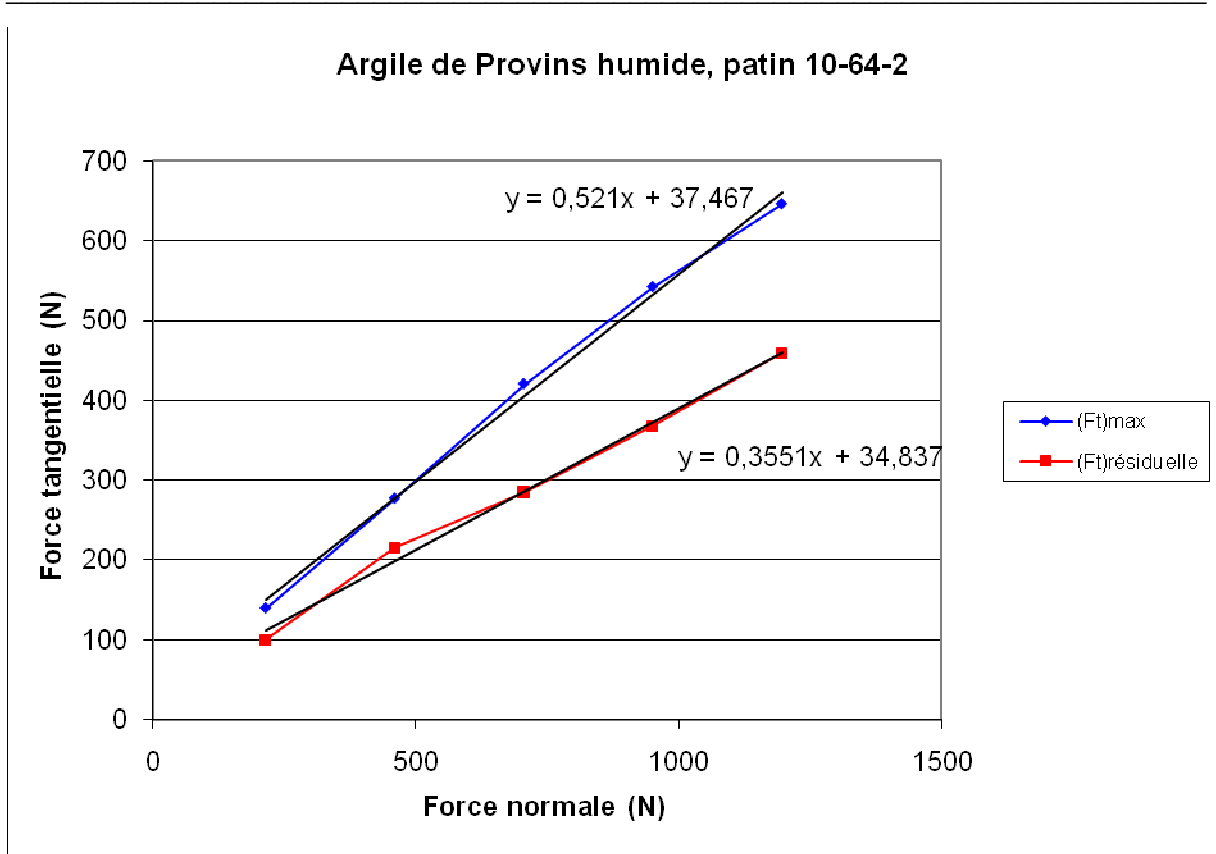


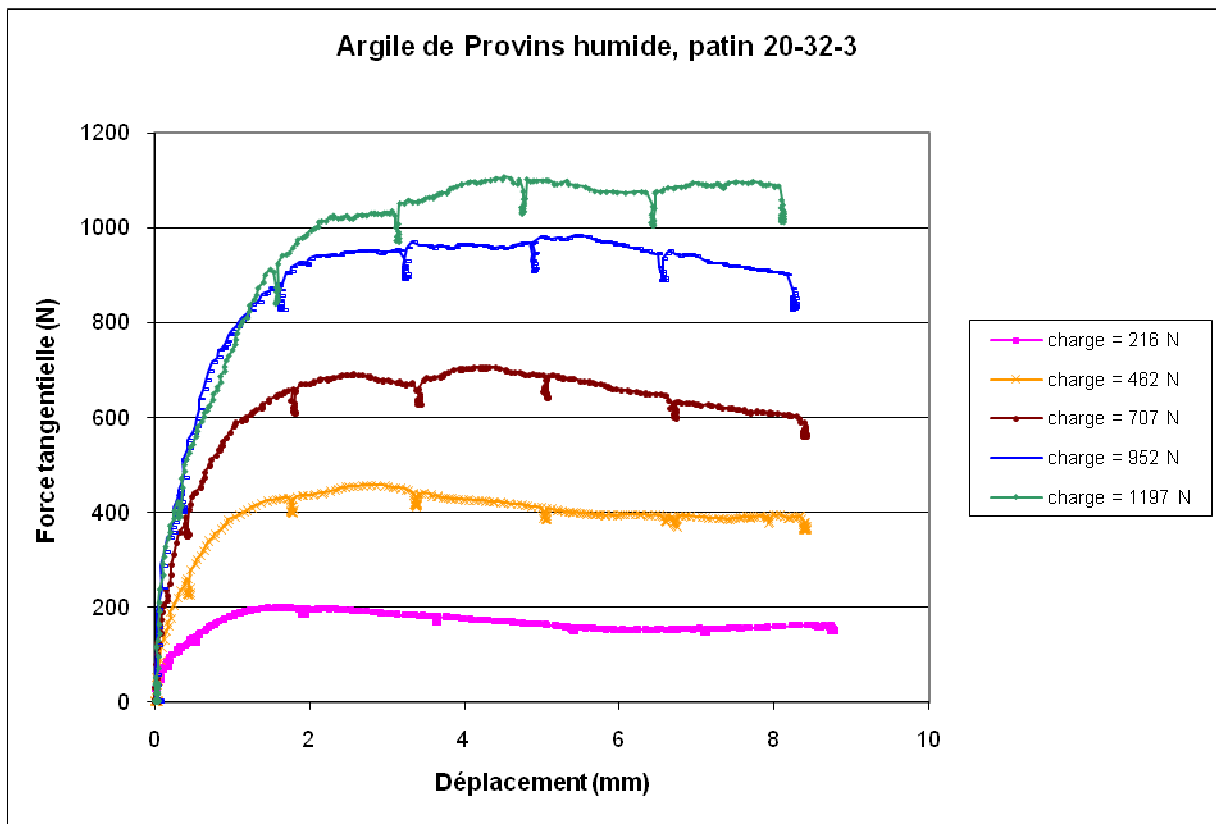
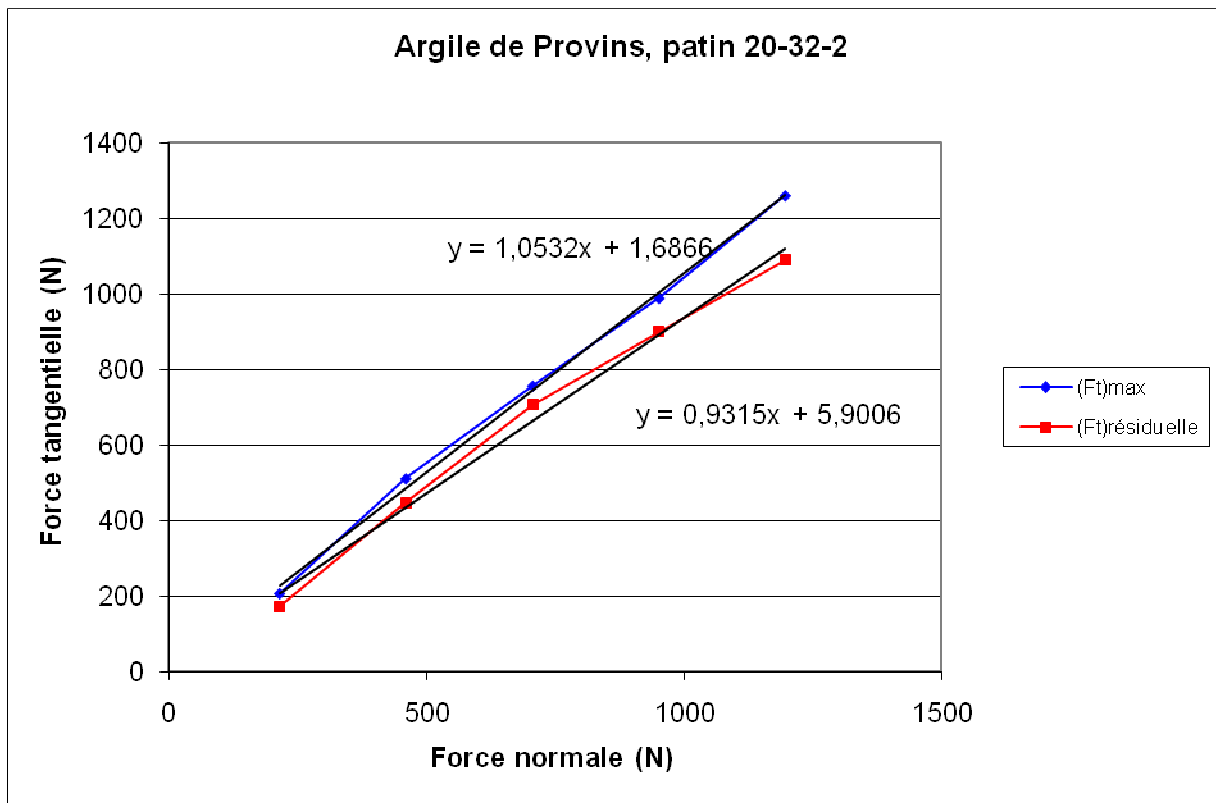


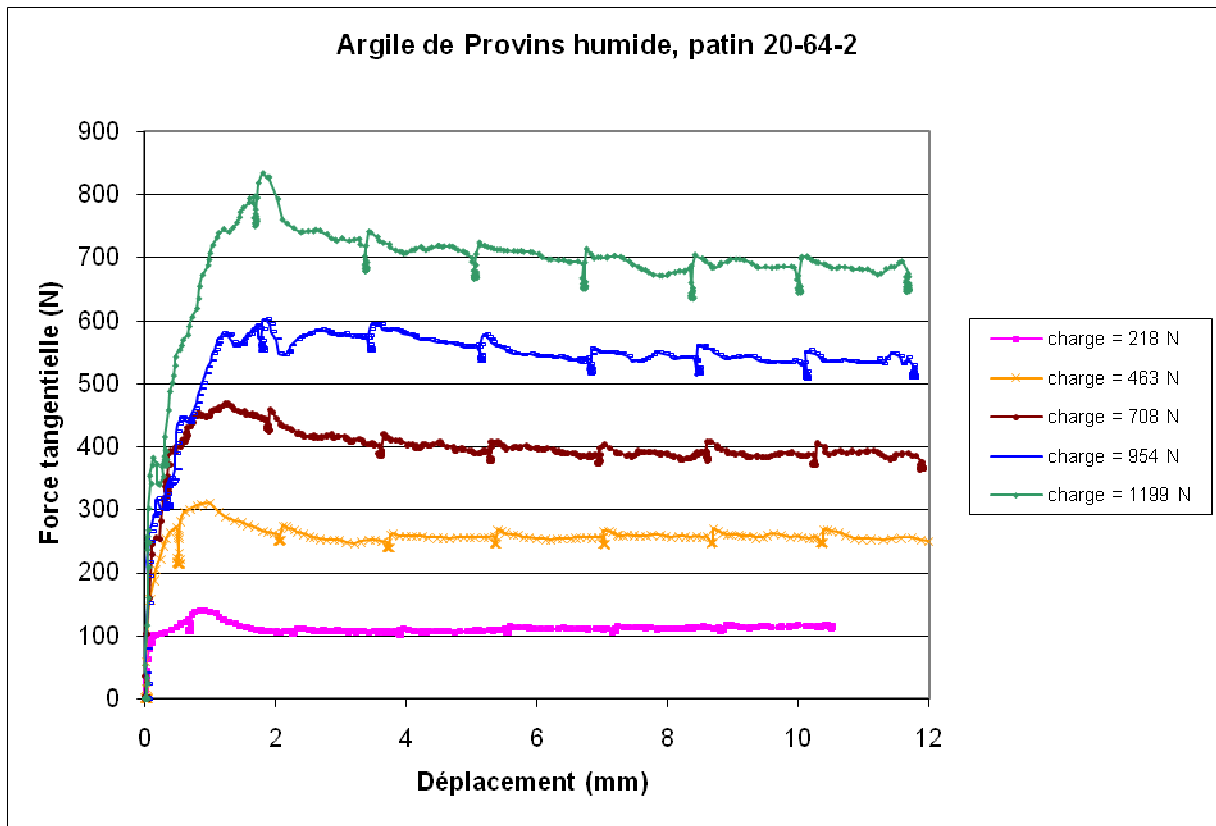
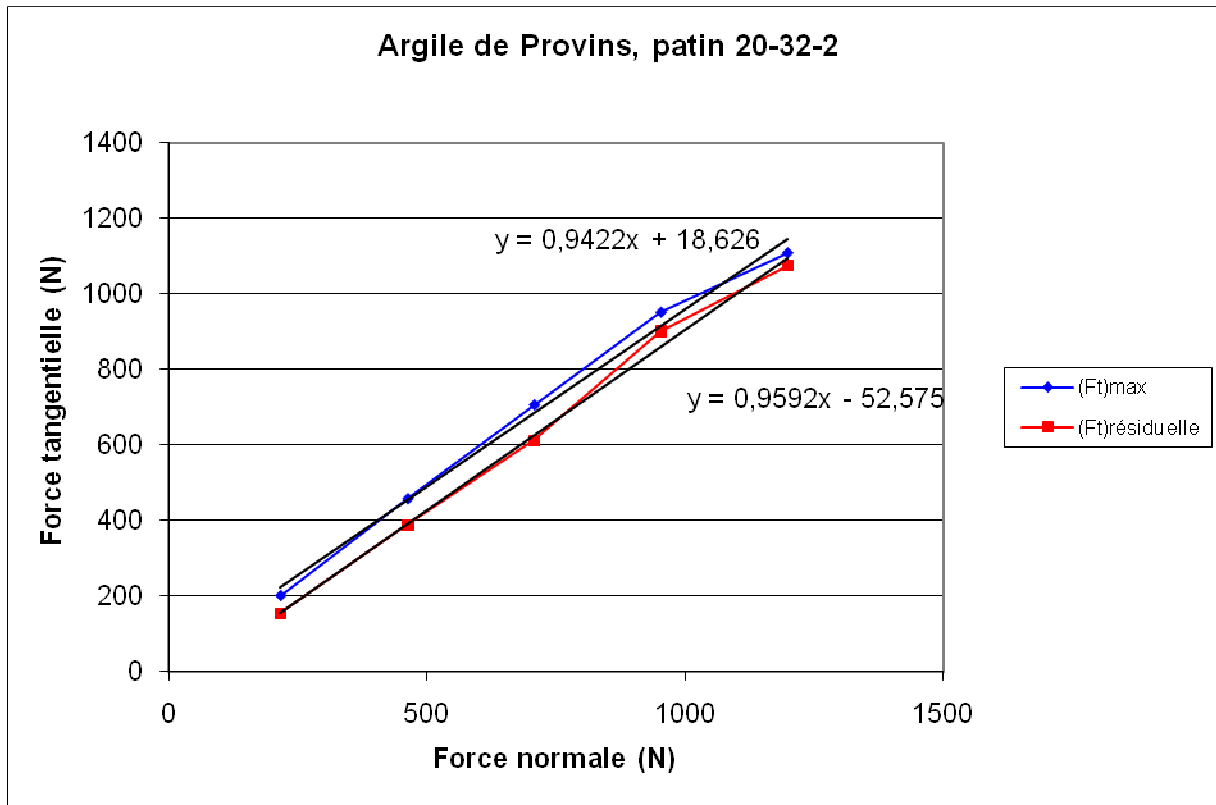
Annexe C : Essais réalisés sur l'argile

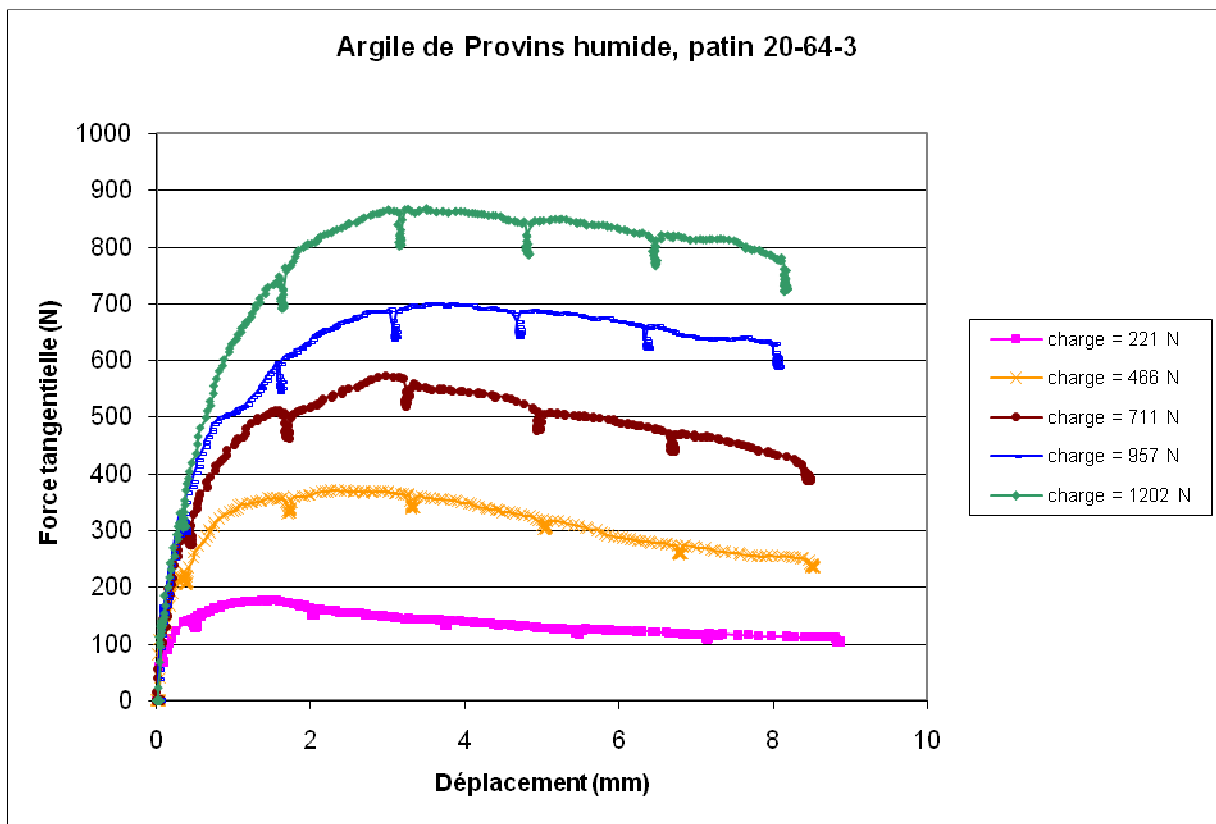
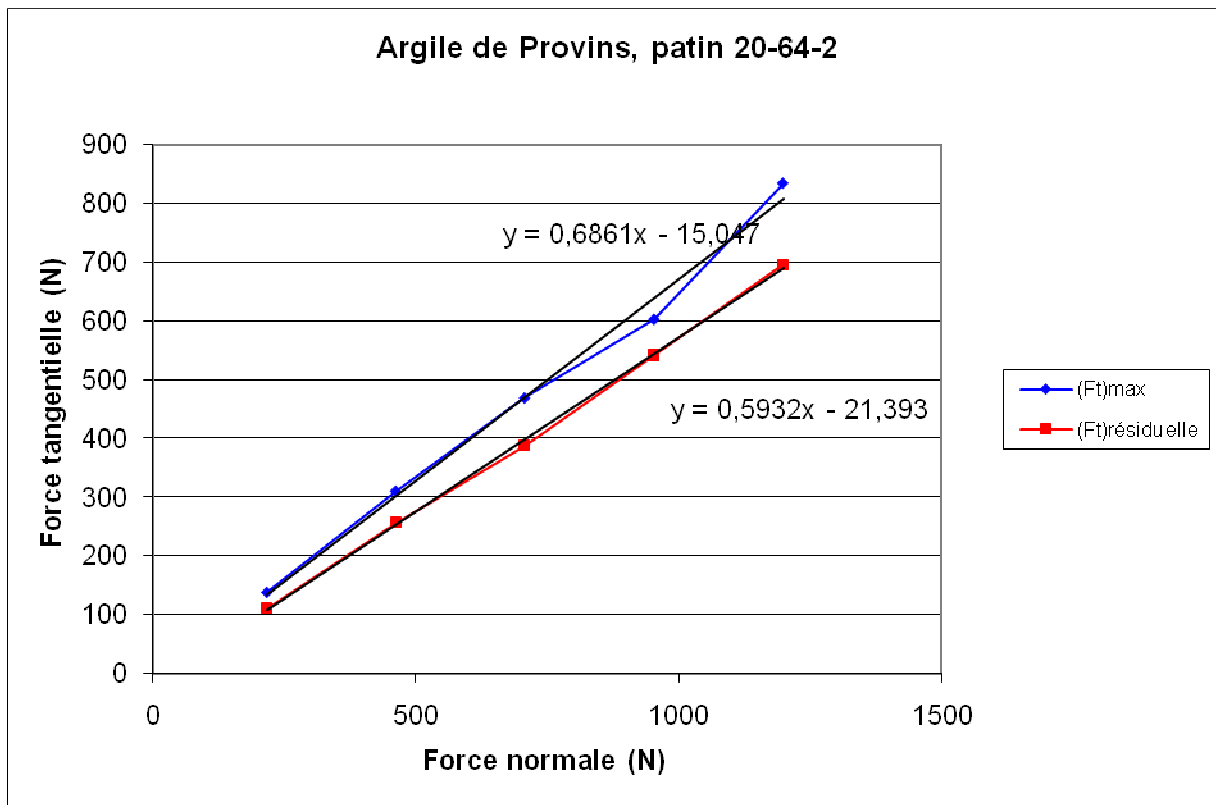
C-1 : Données des essais et calcul des coefficients

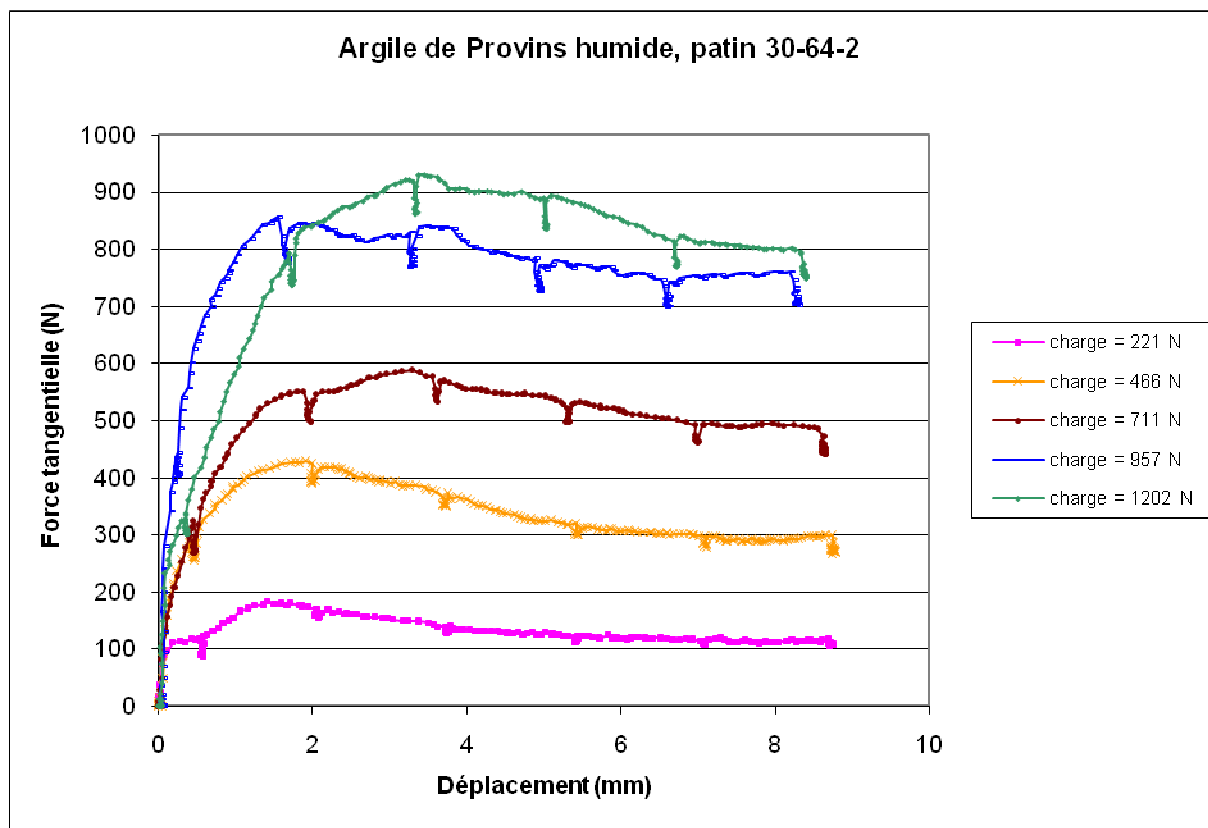
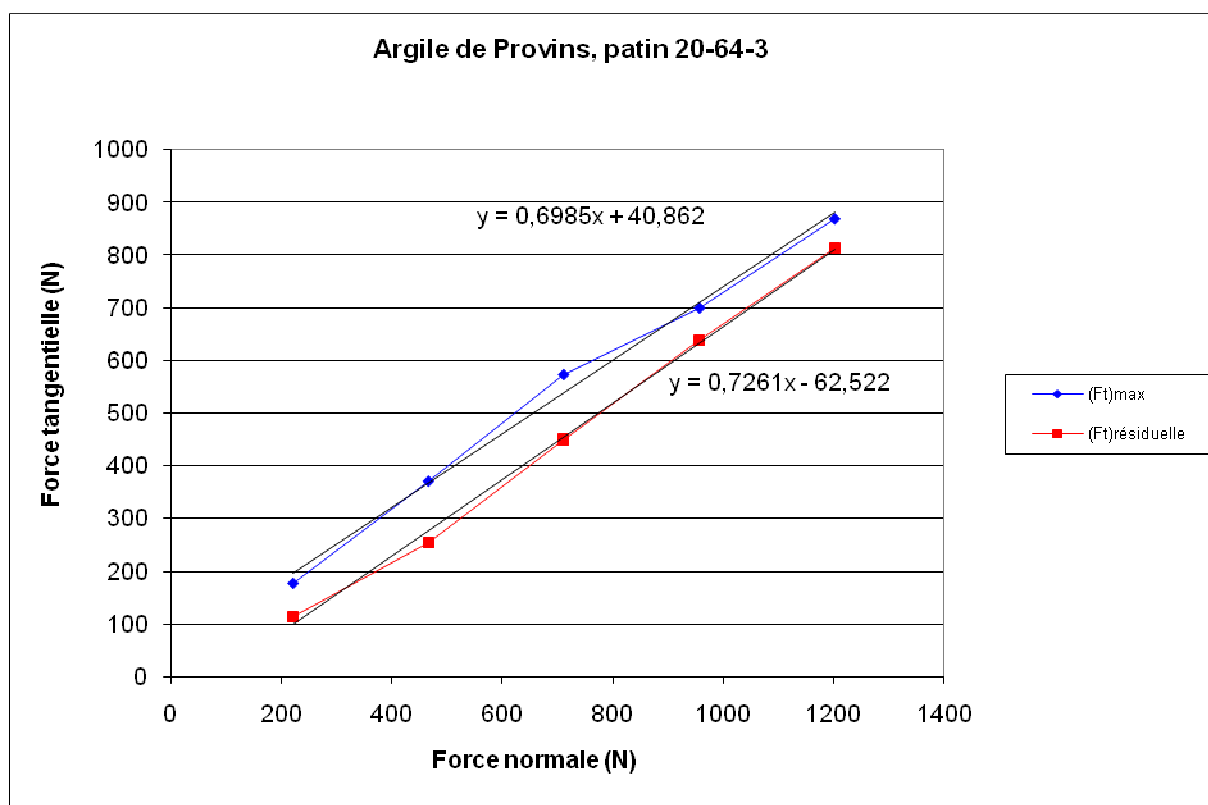


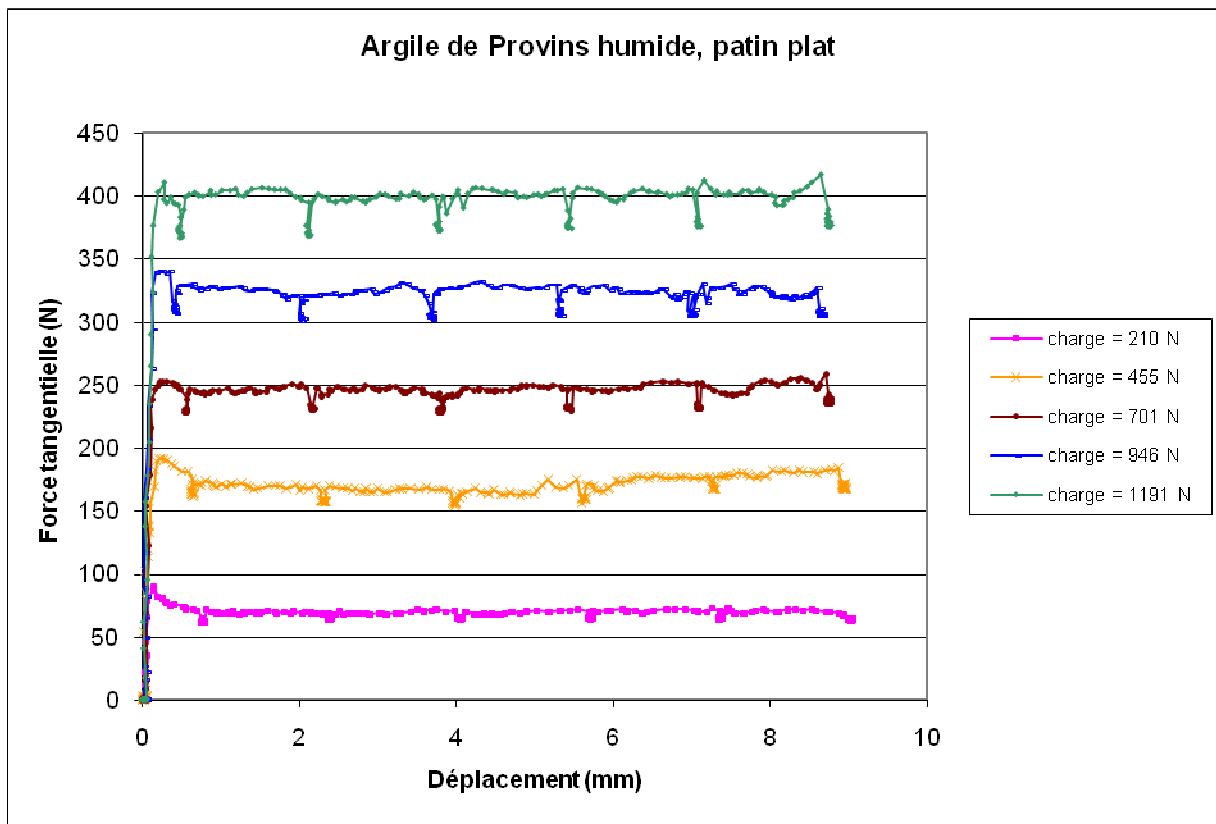
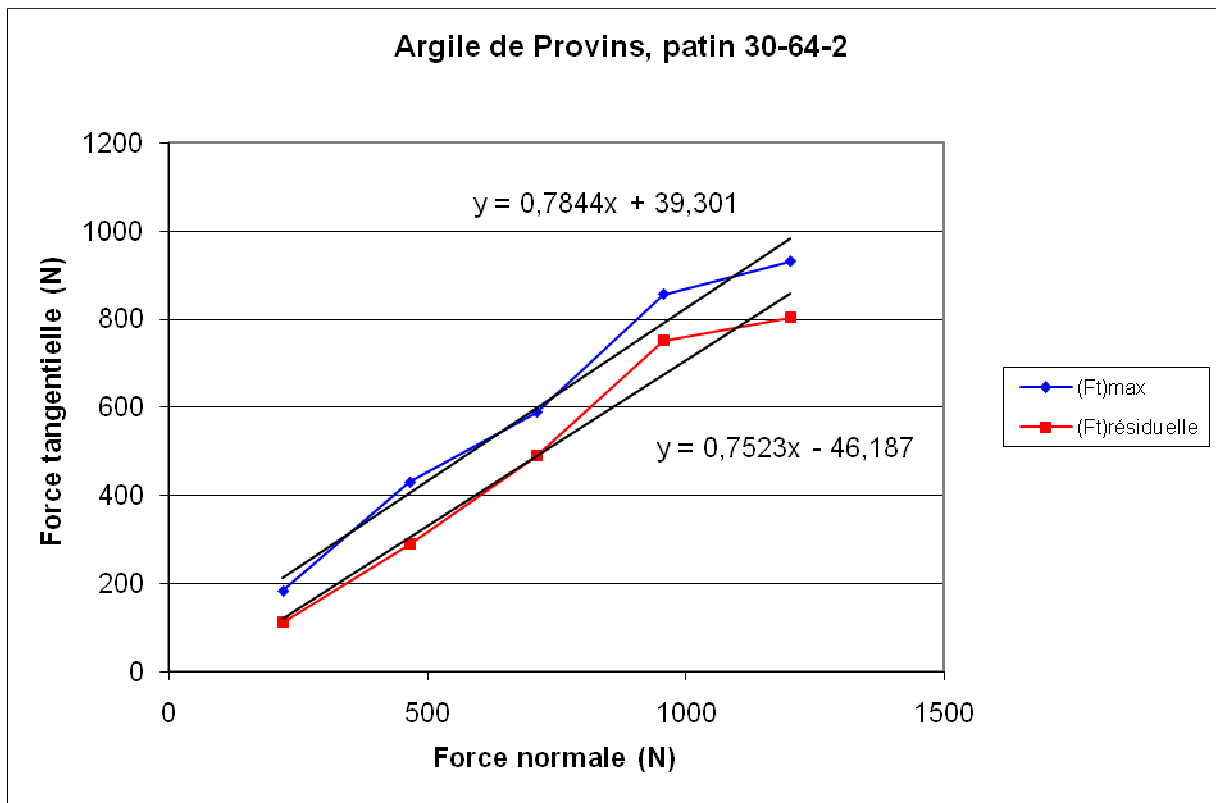


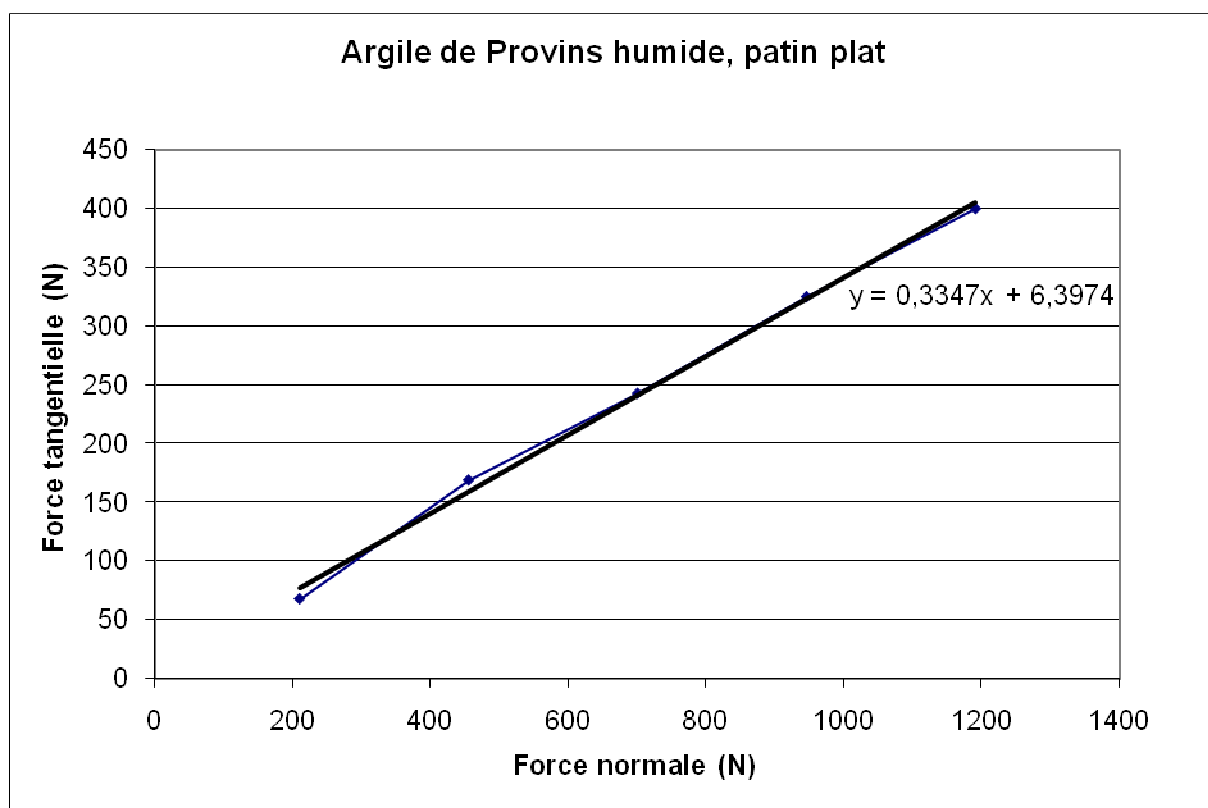




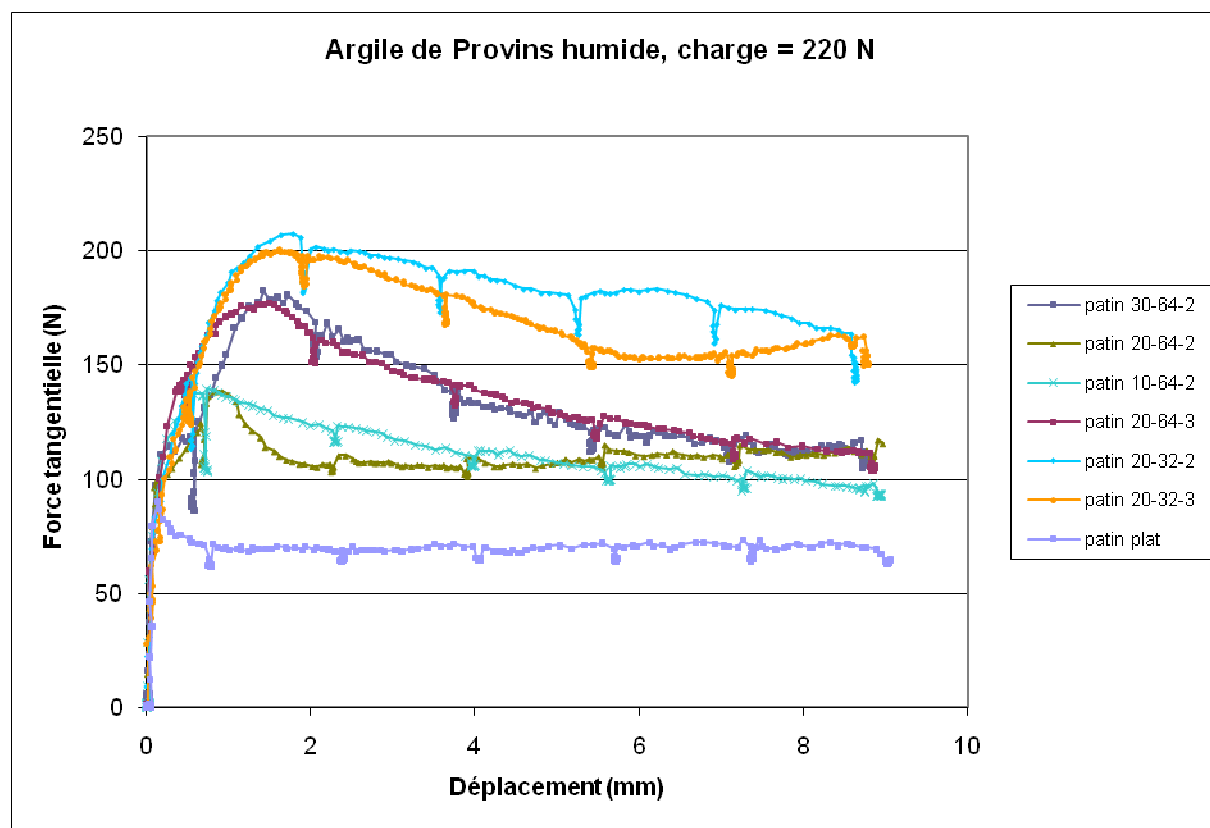


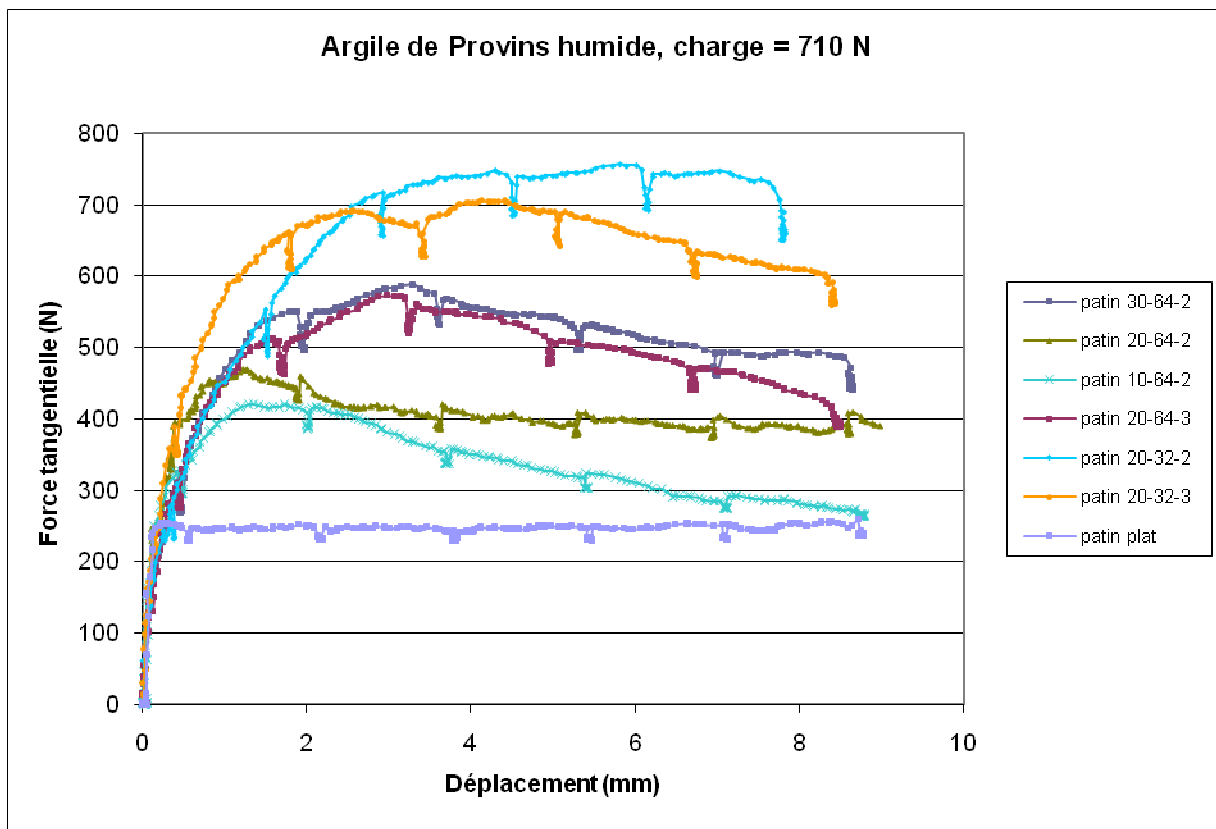
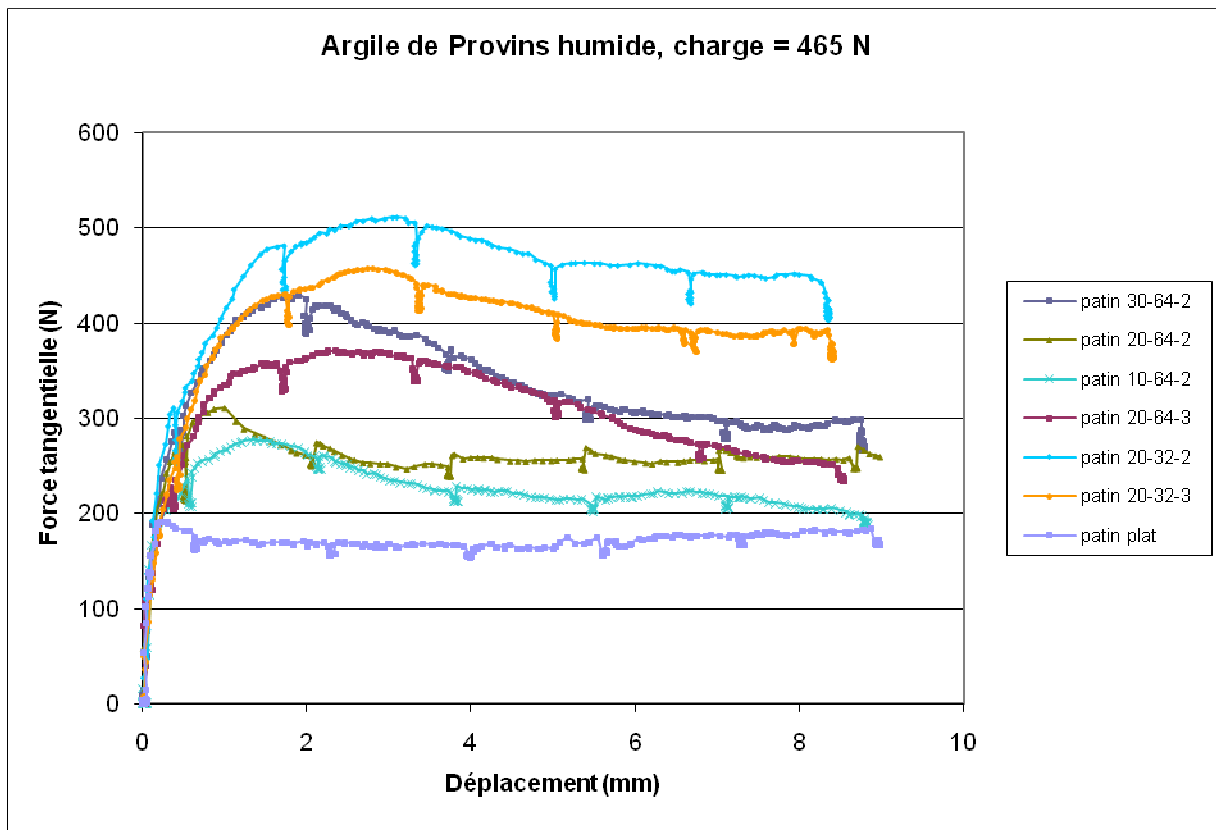


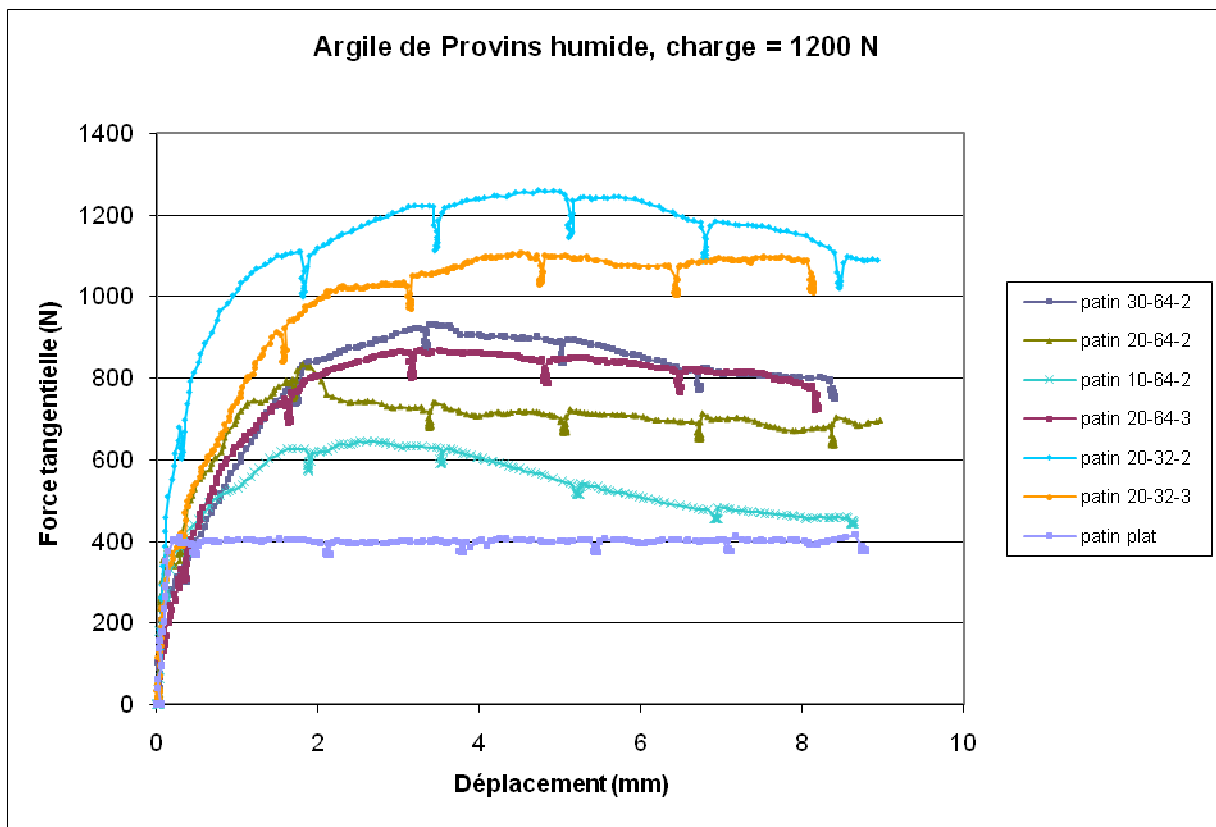
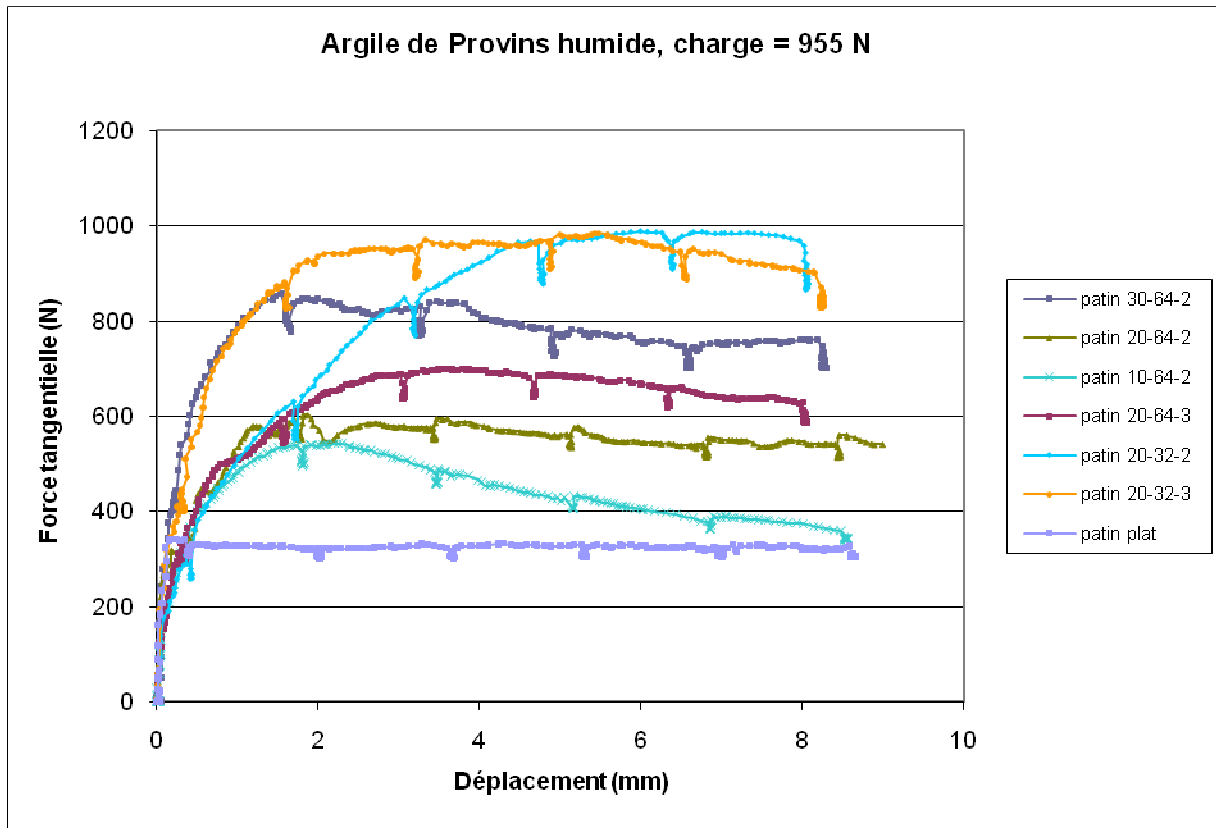




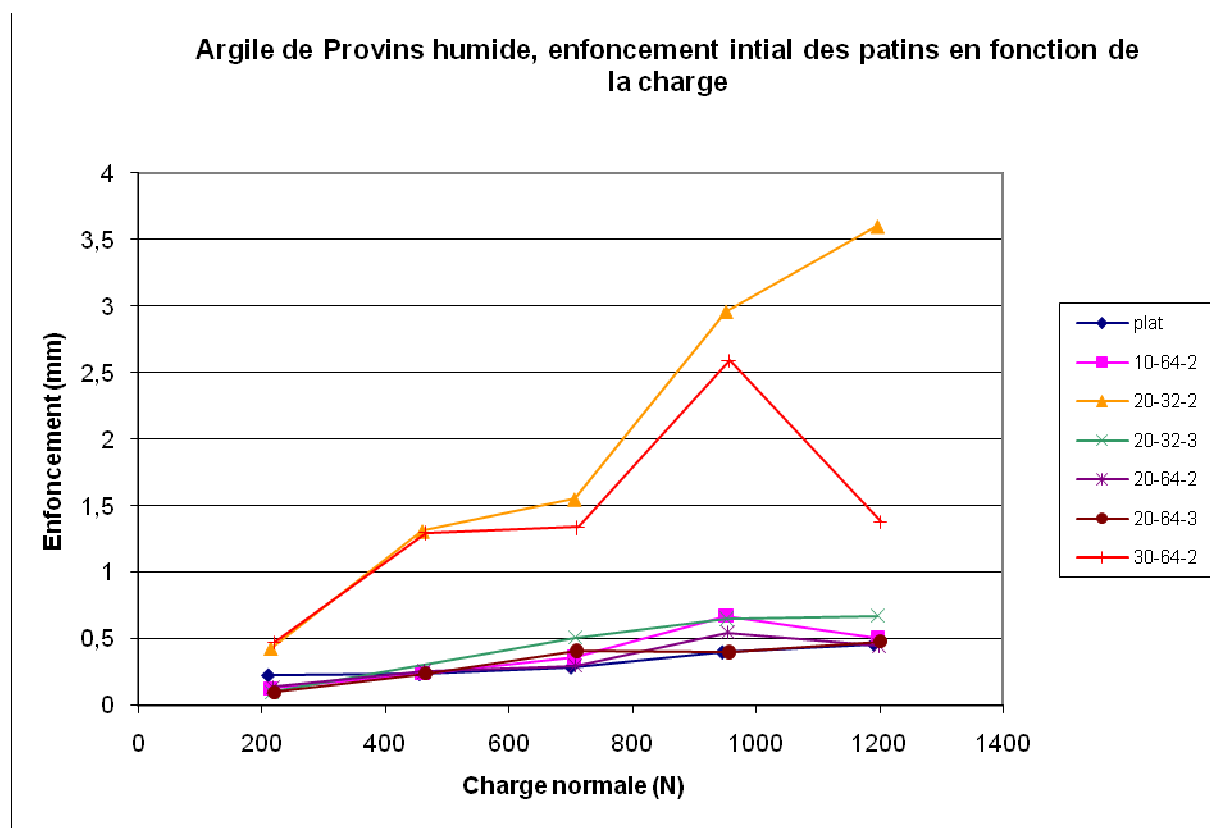
C-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée



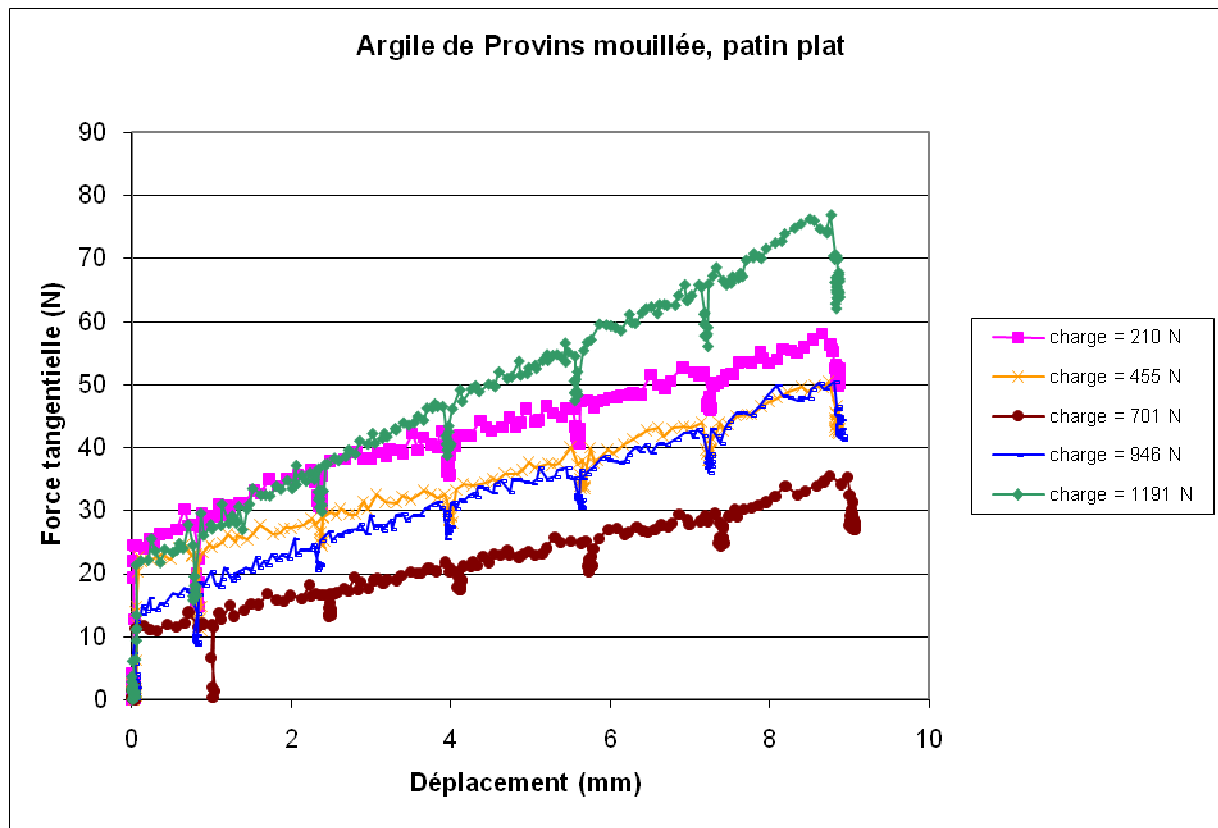


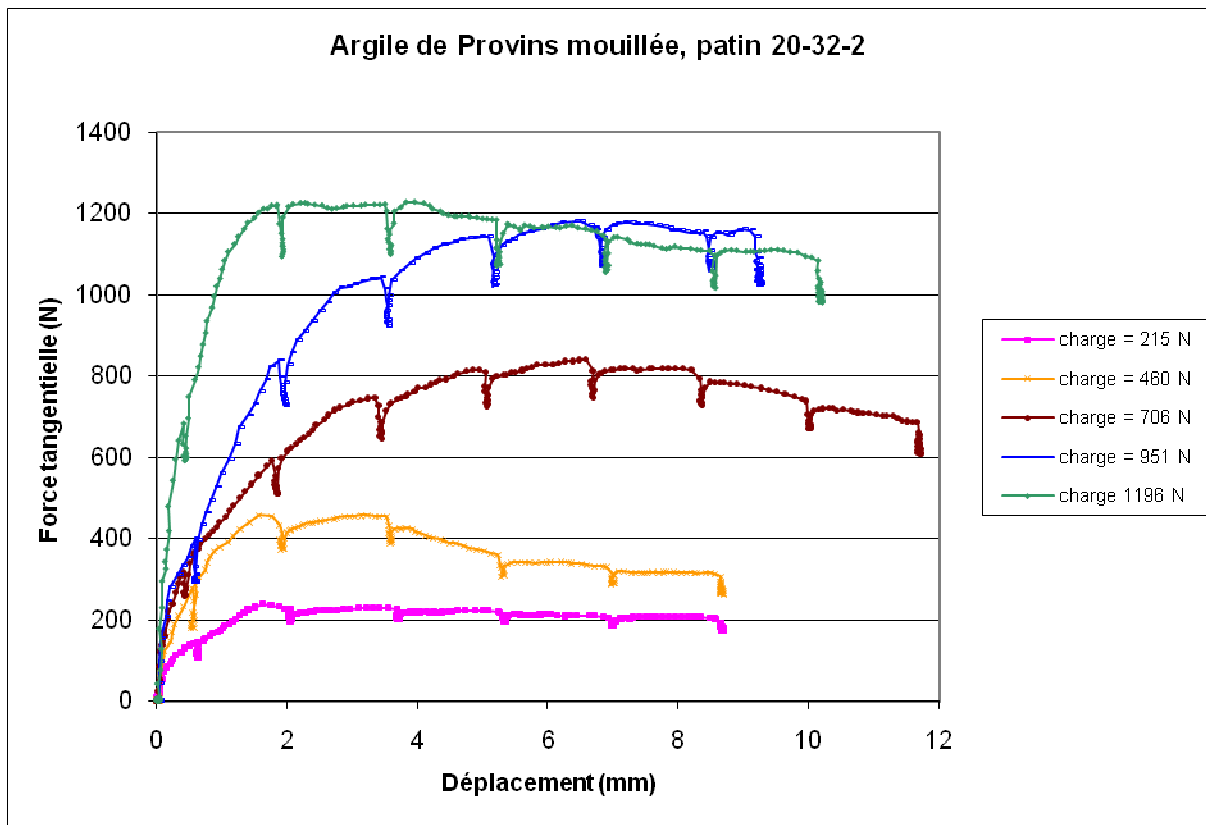
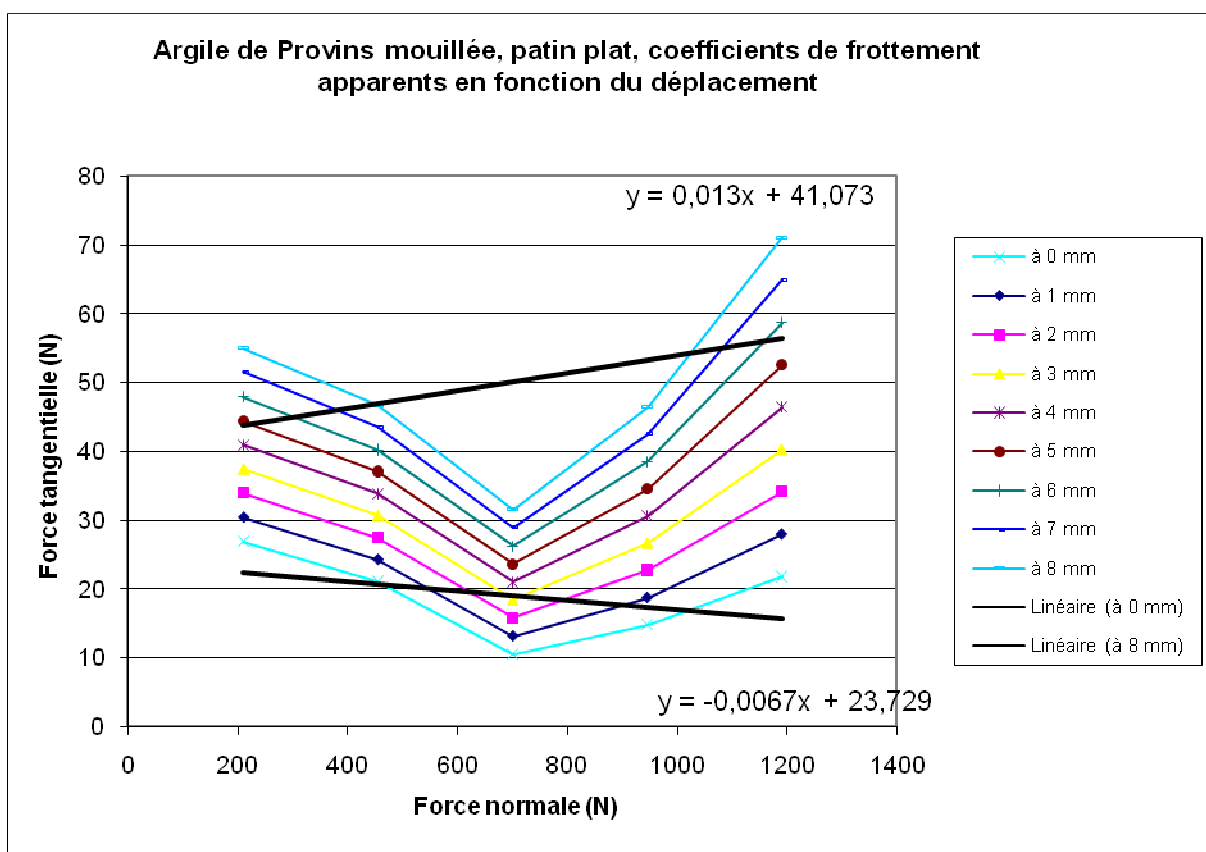


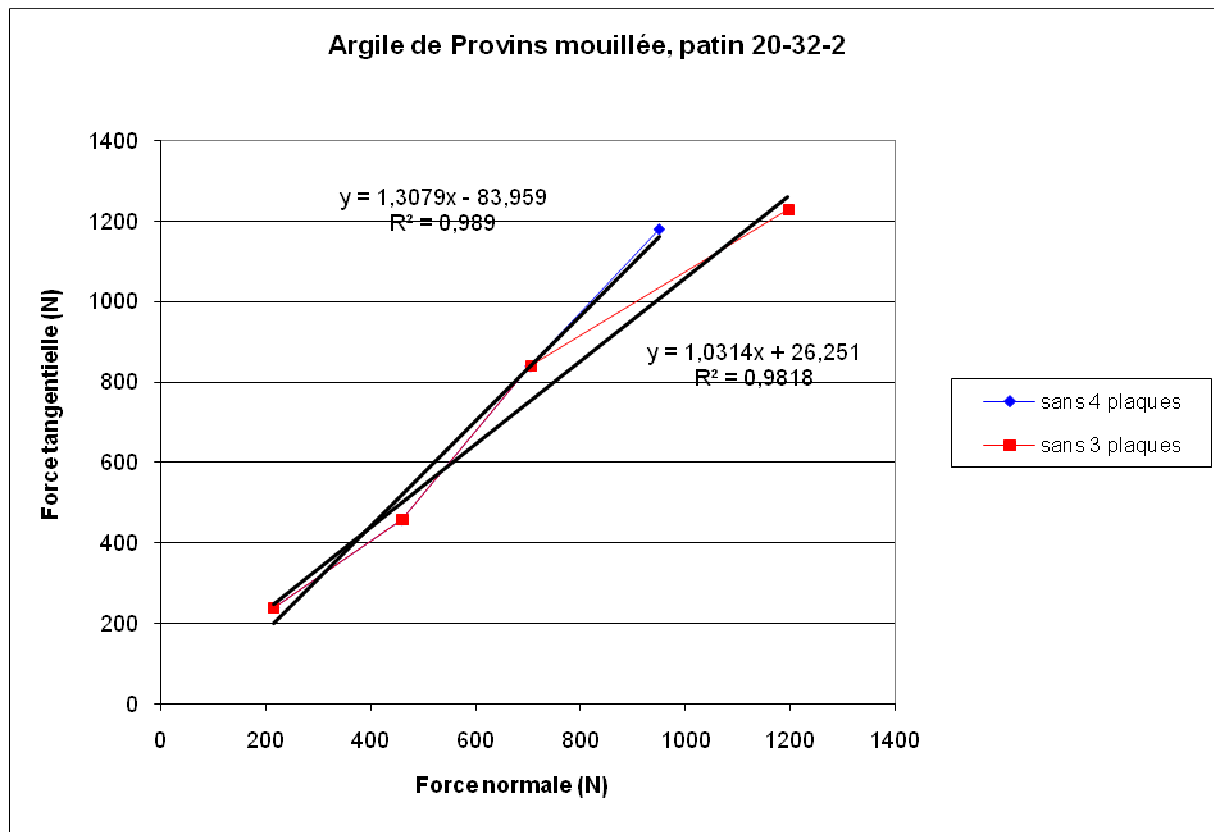
C-3 : Données d'enfoncement

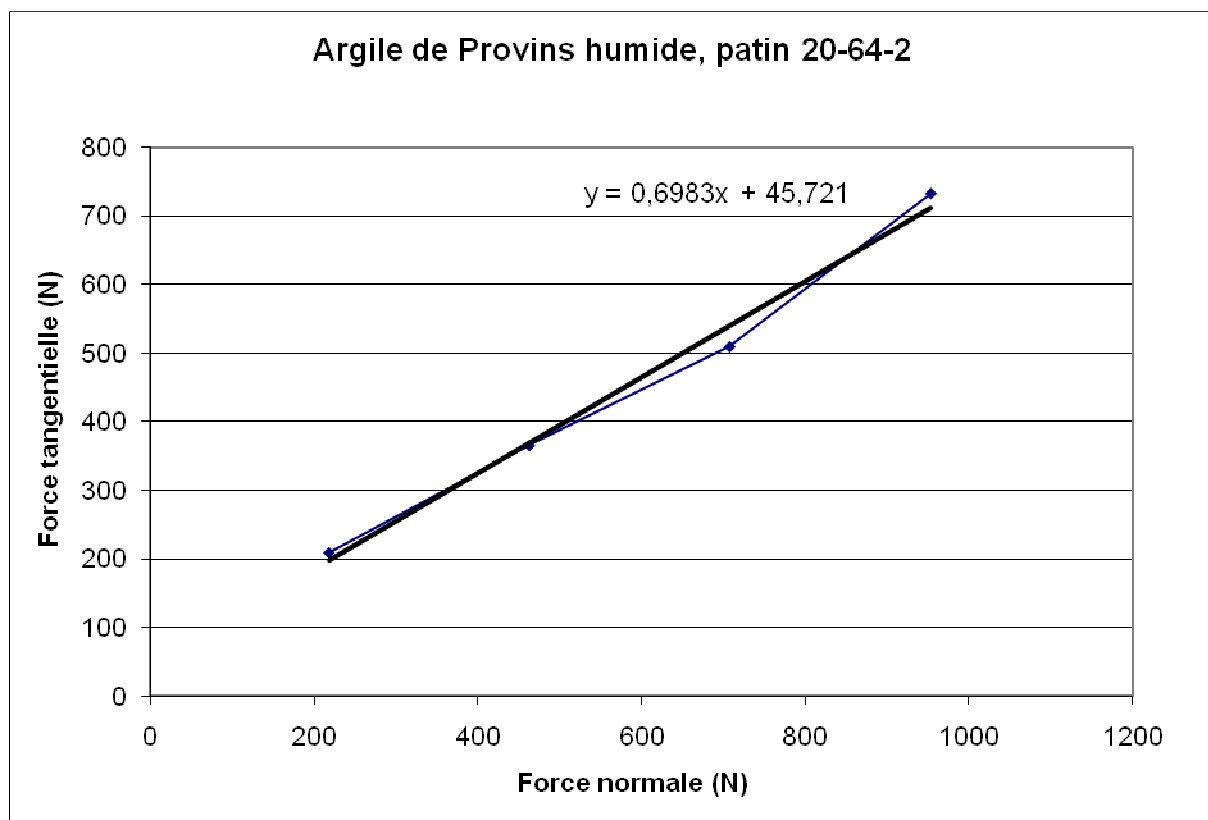
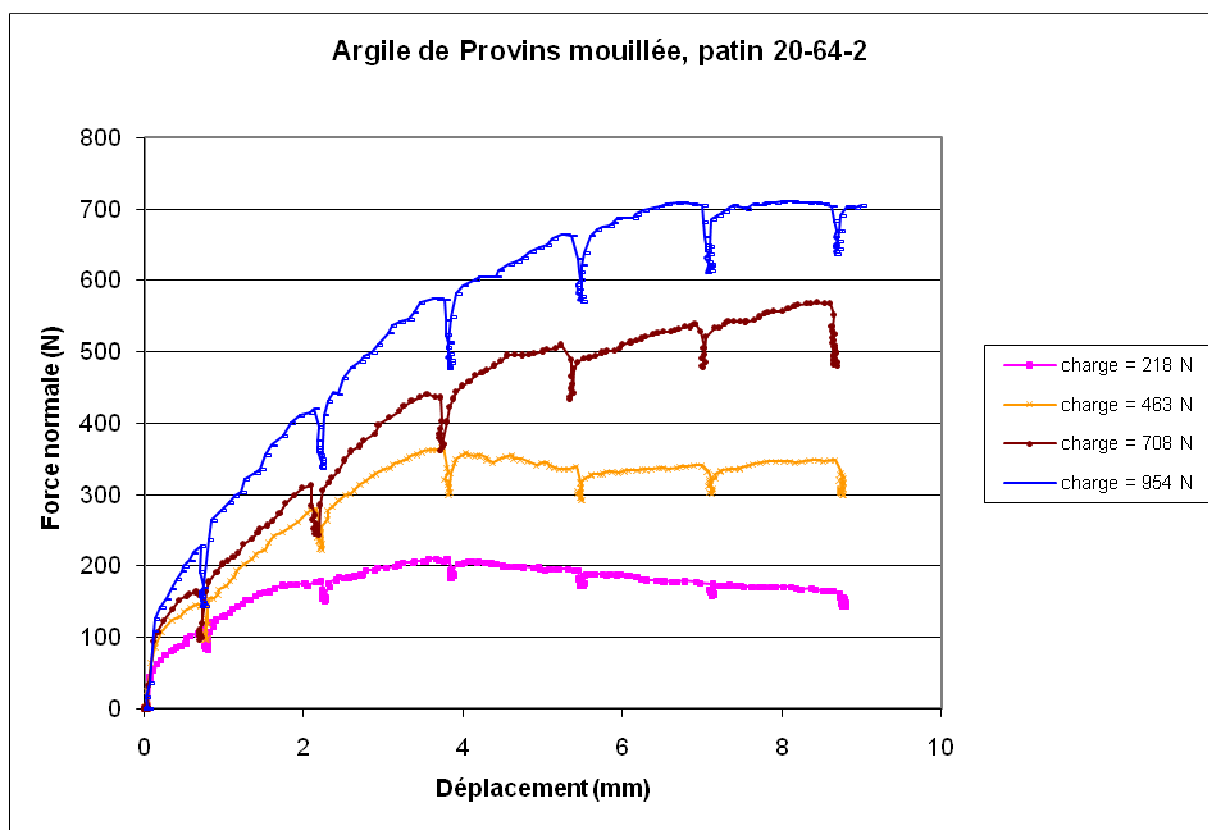


C-4 : Données des essais sur l'argile mouillée



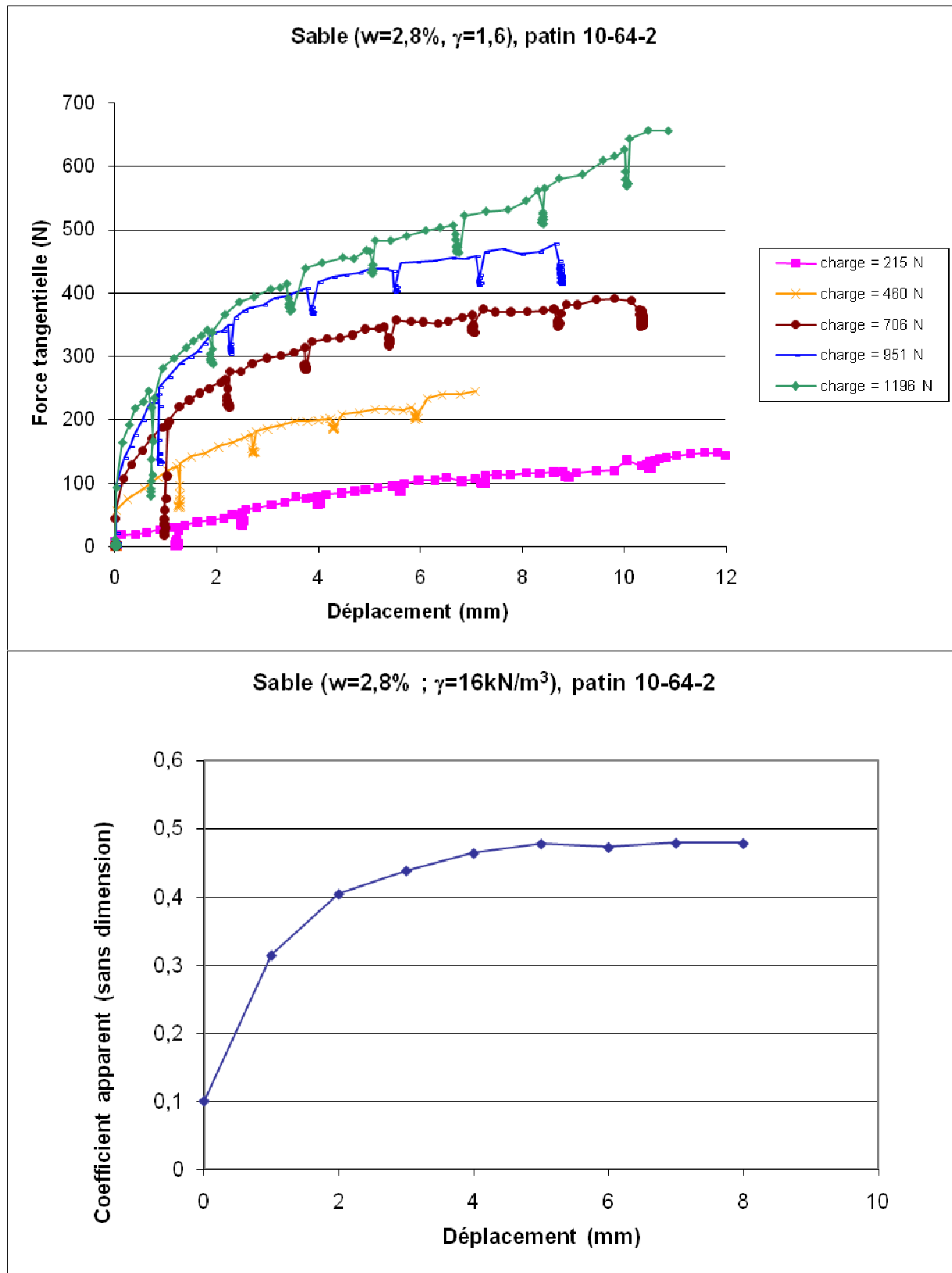


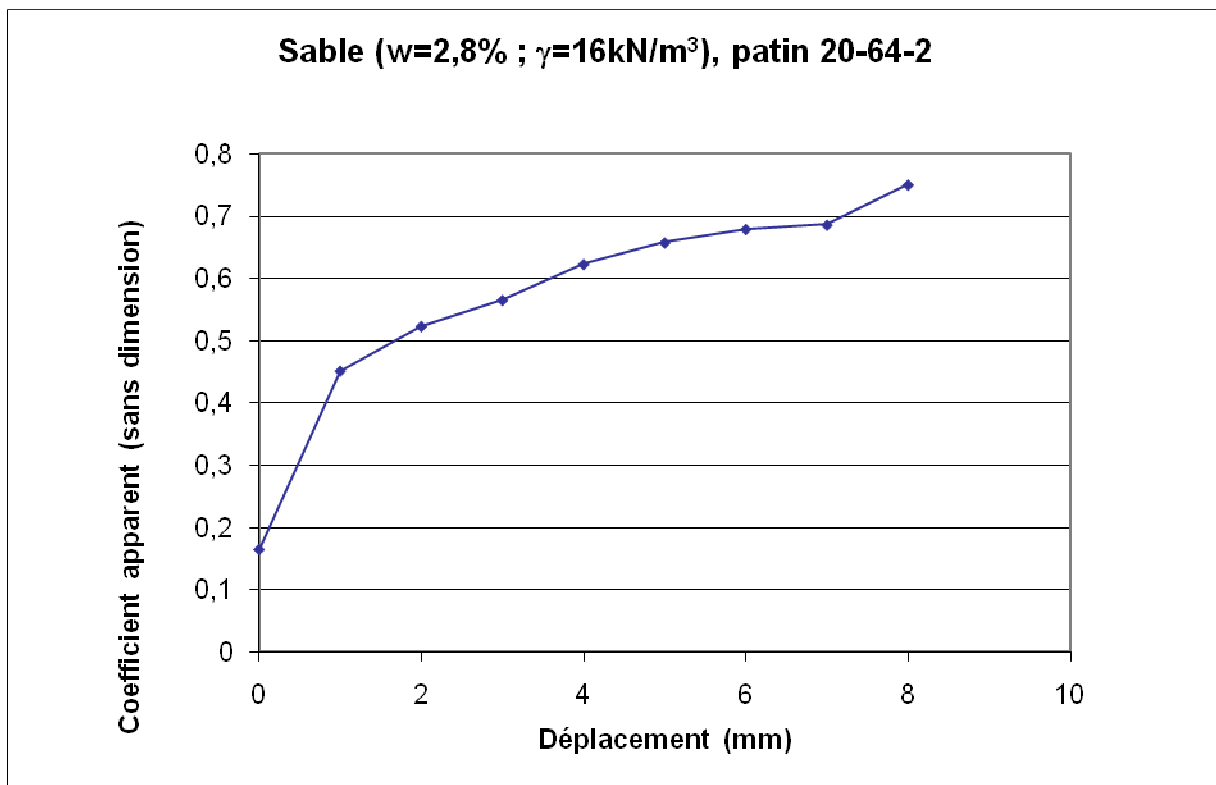
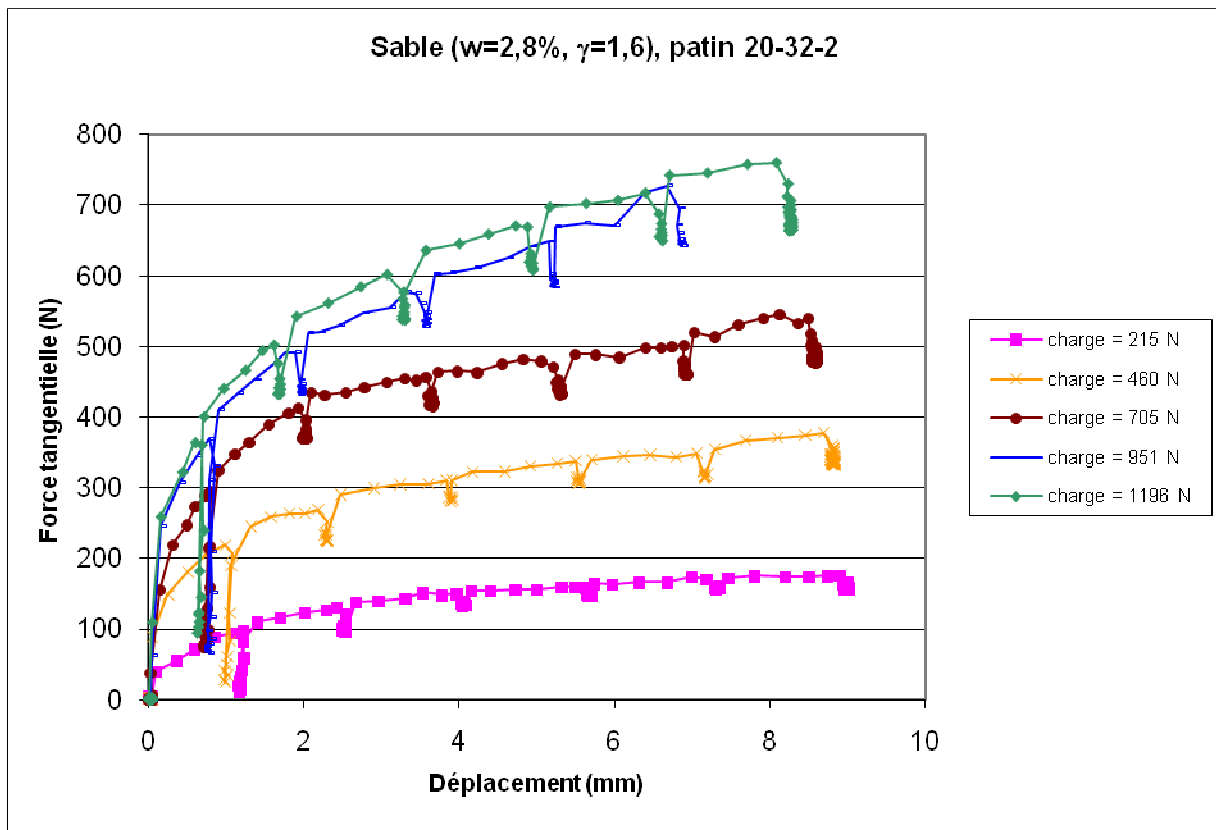


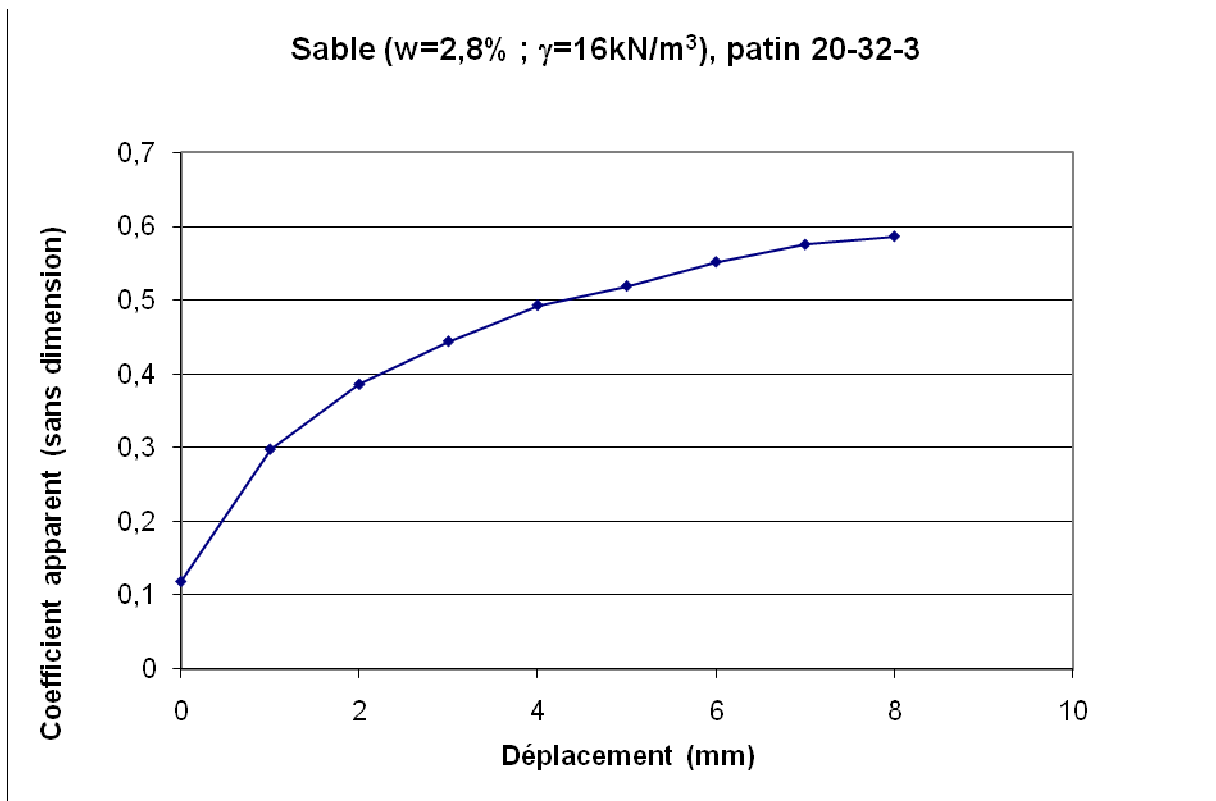
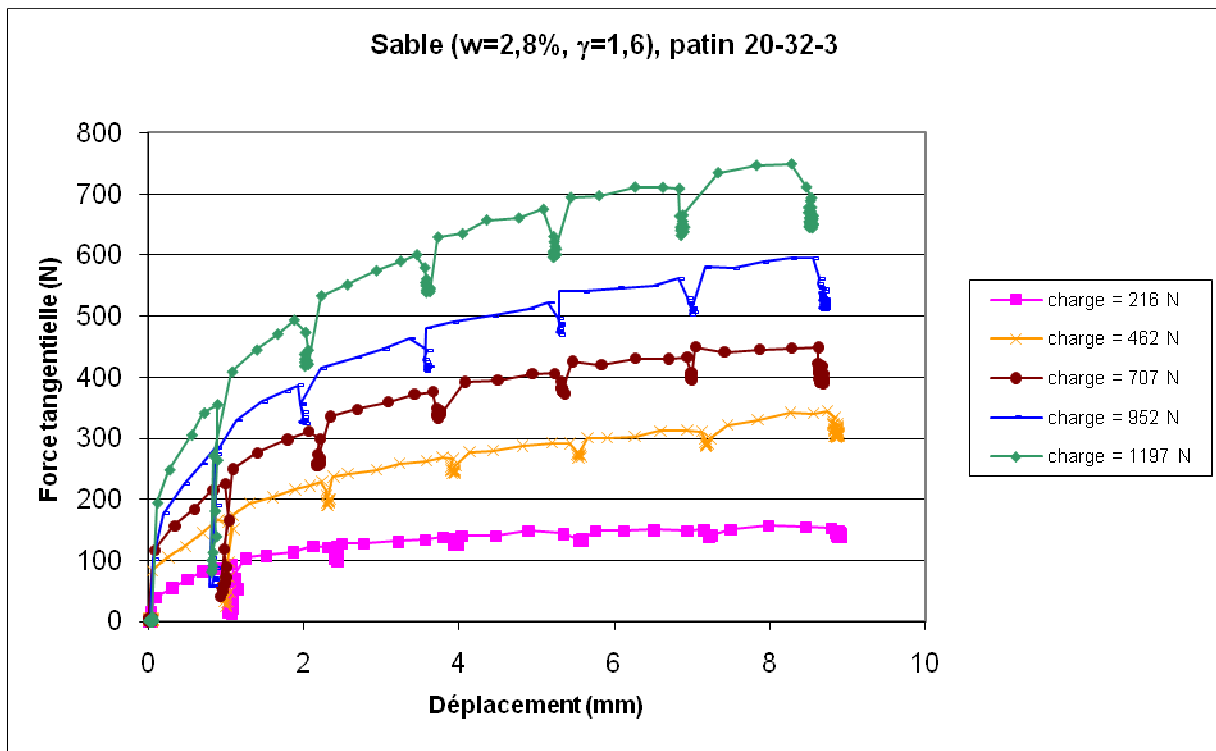


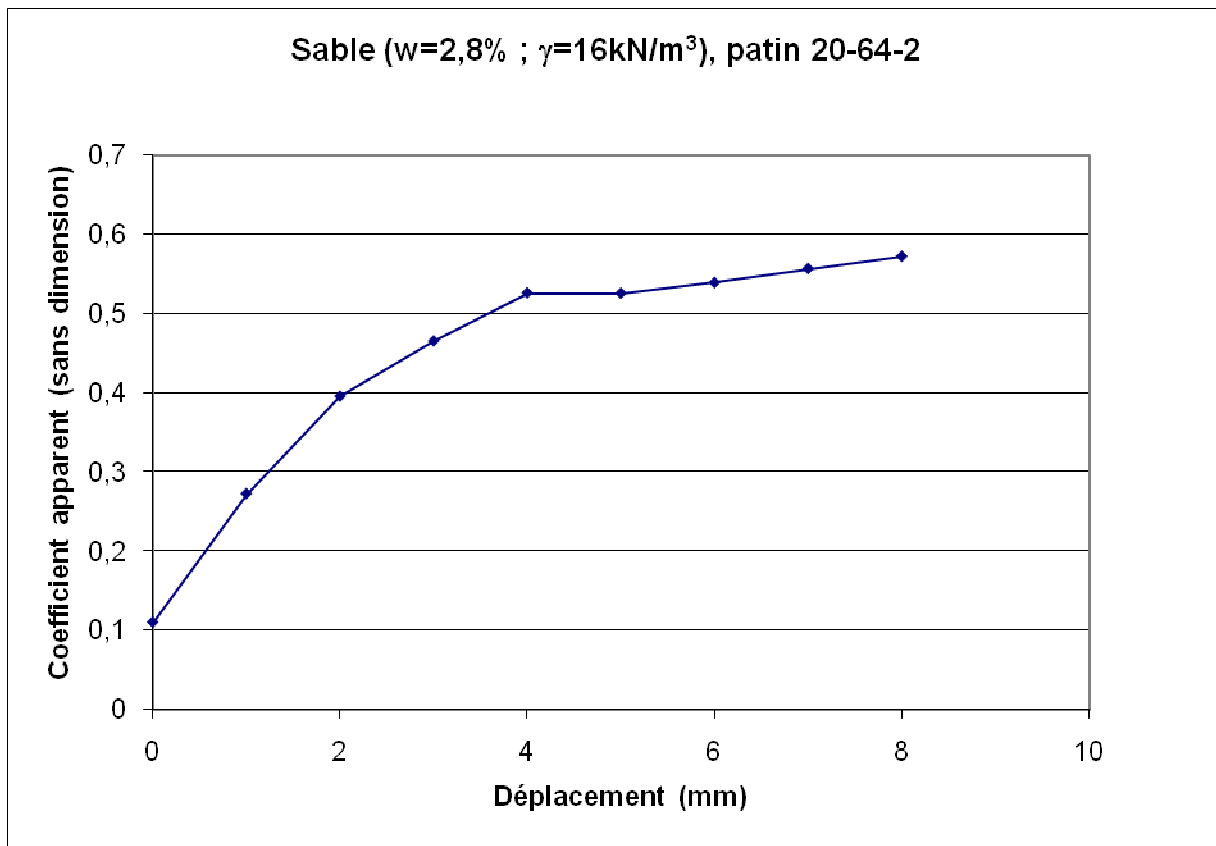
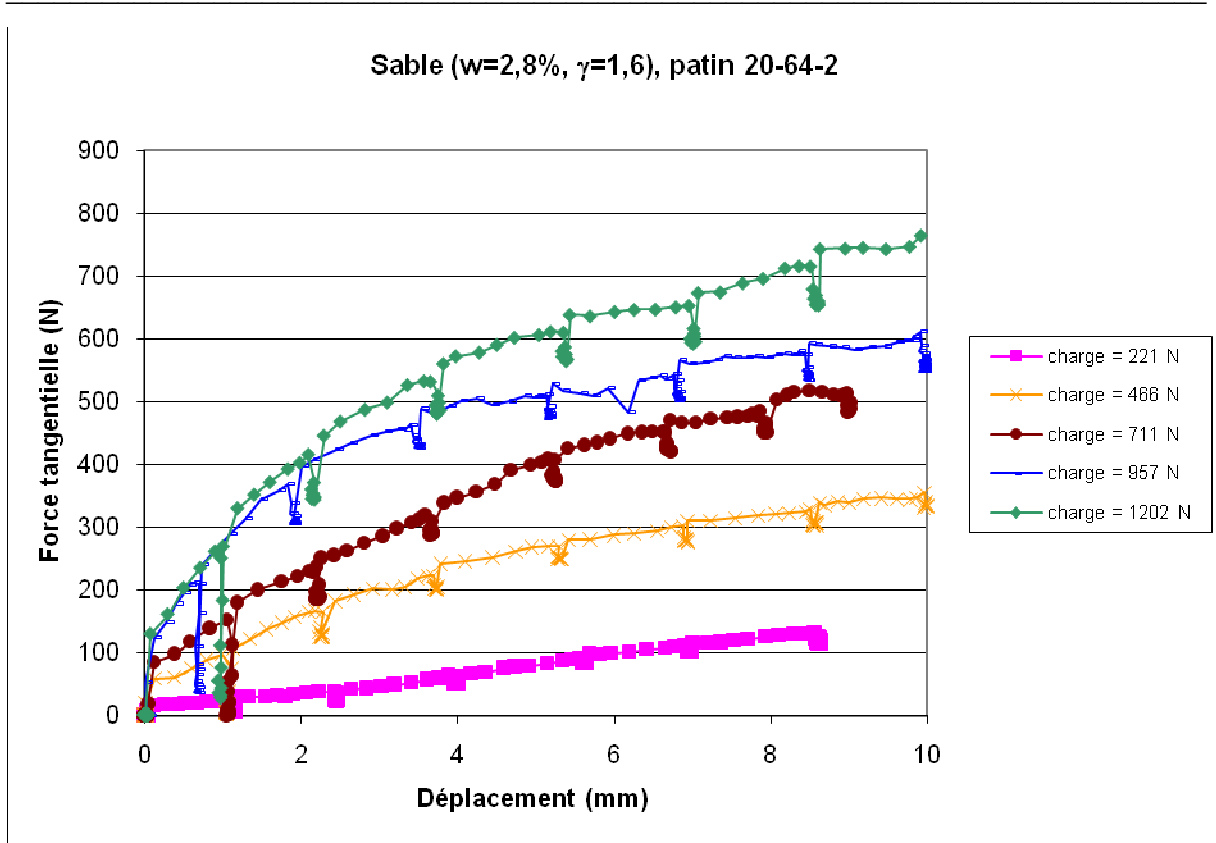
Annexe D : Essais réalisés sur le sable lâche

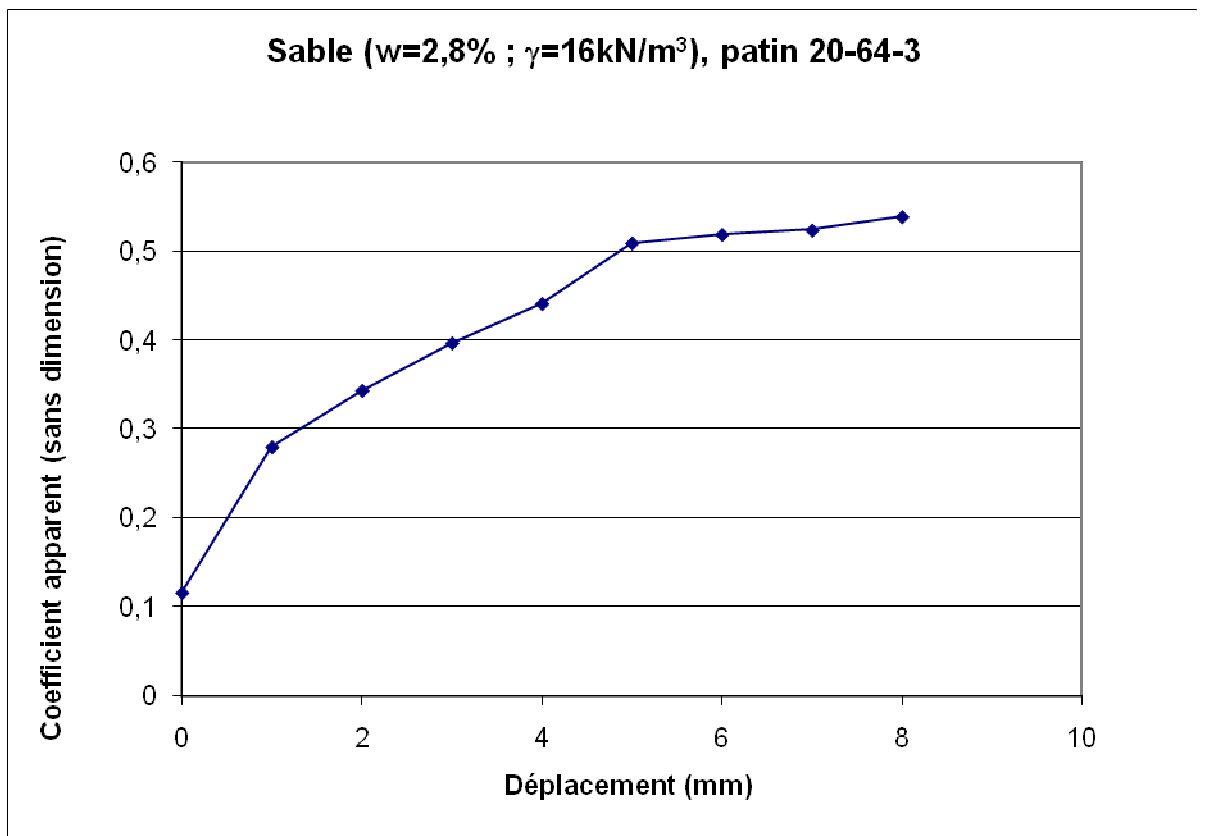
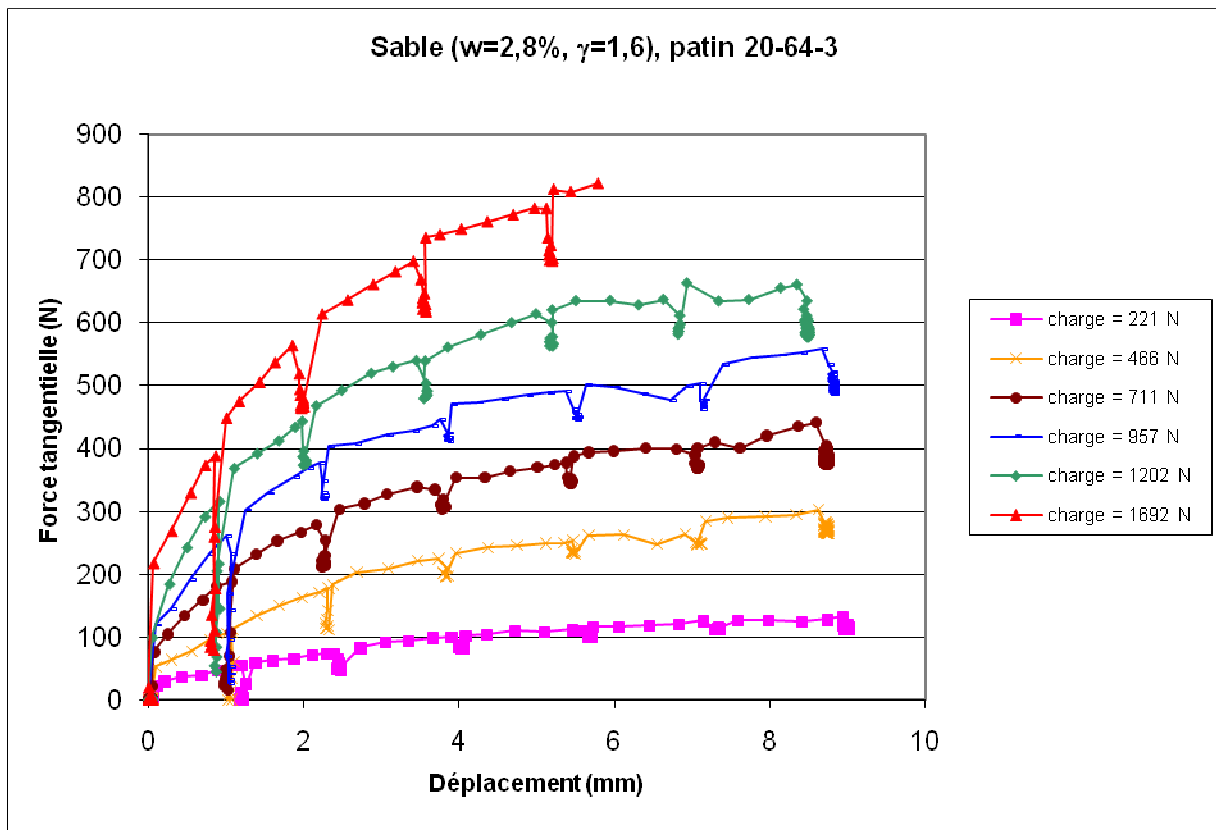
D-1 : Données des essais et calcul des coefficients

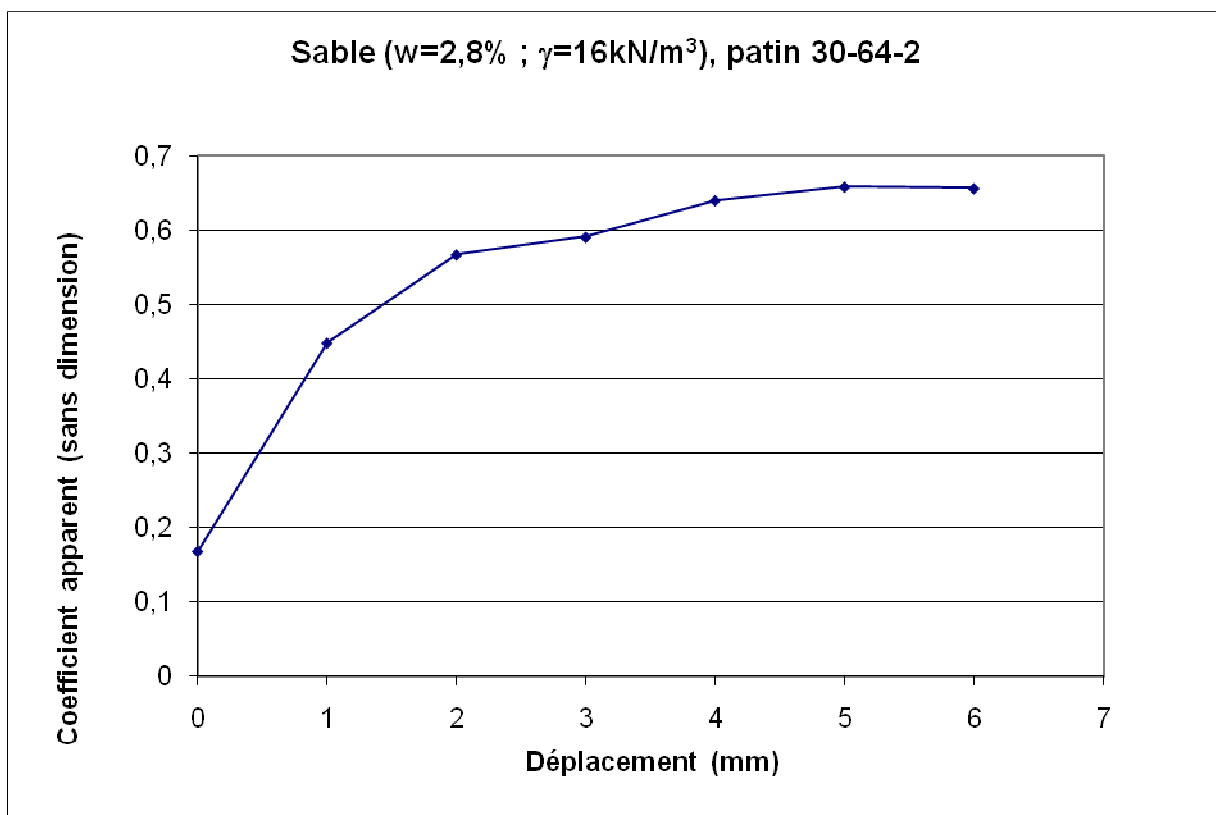
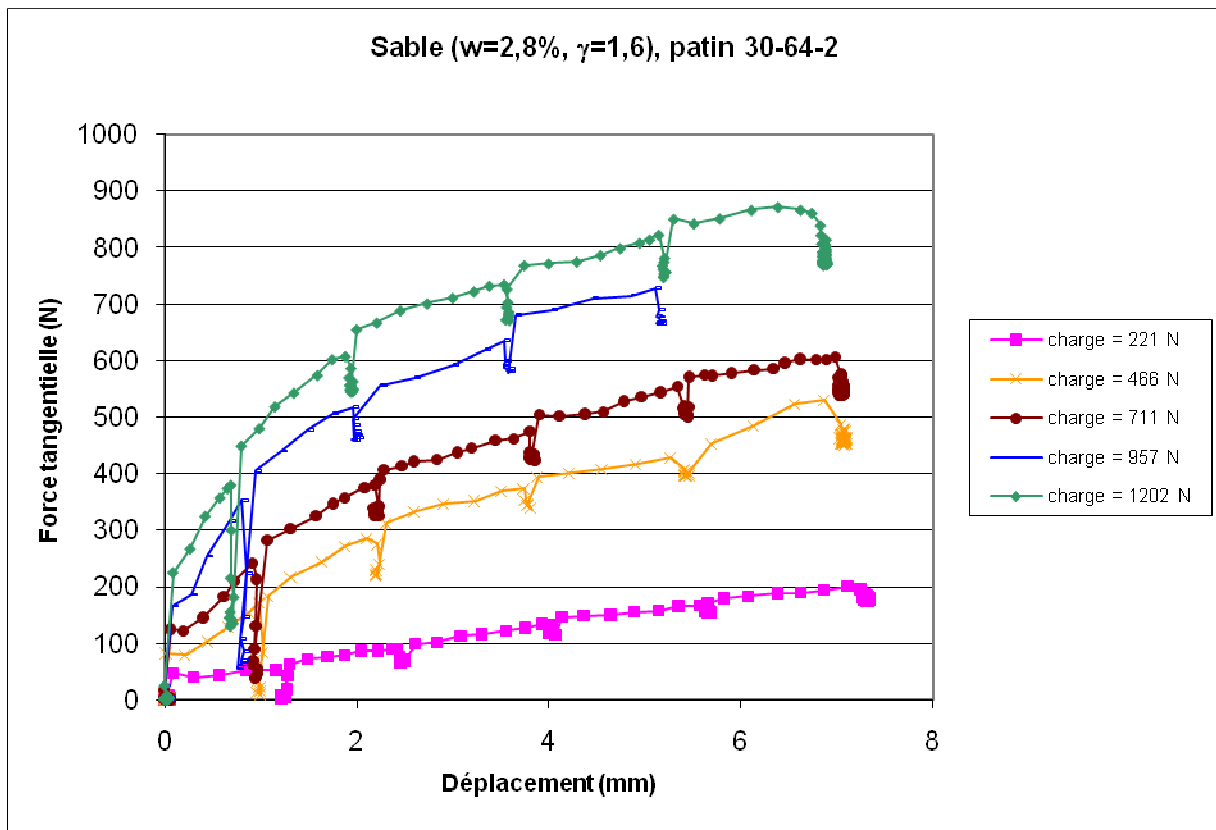


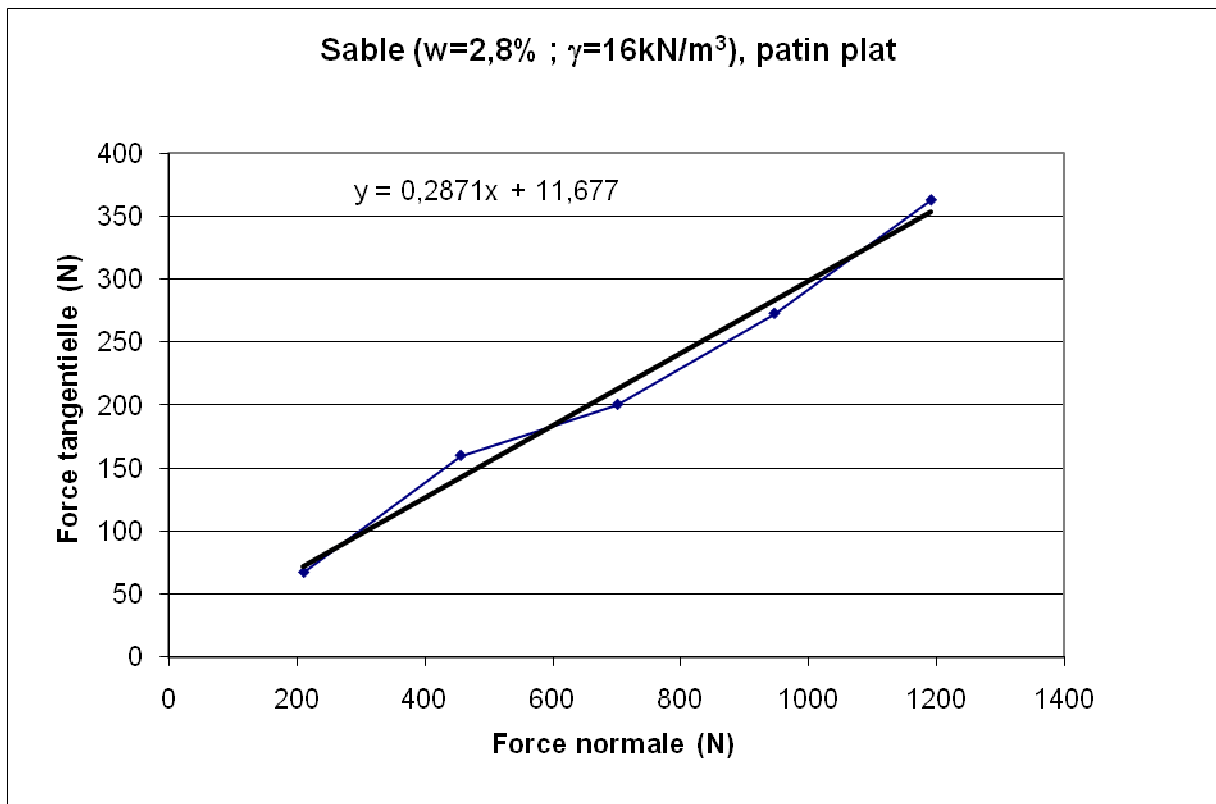
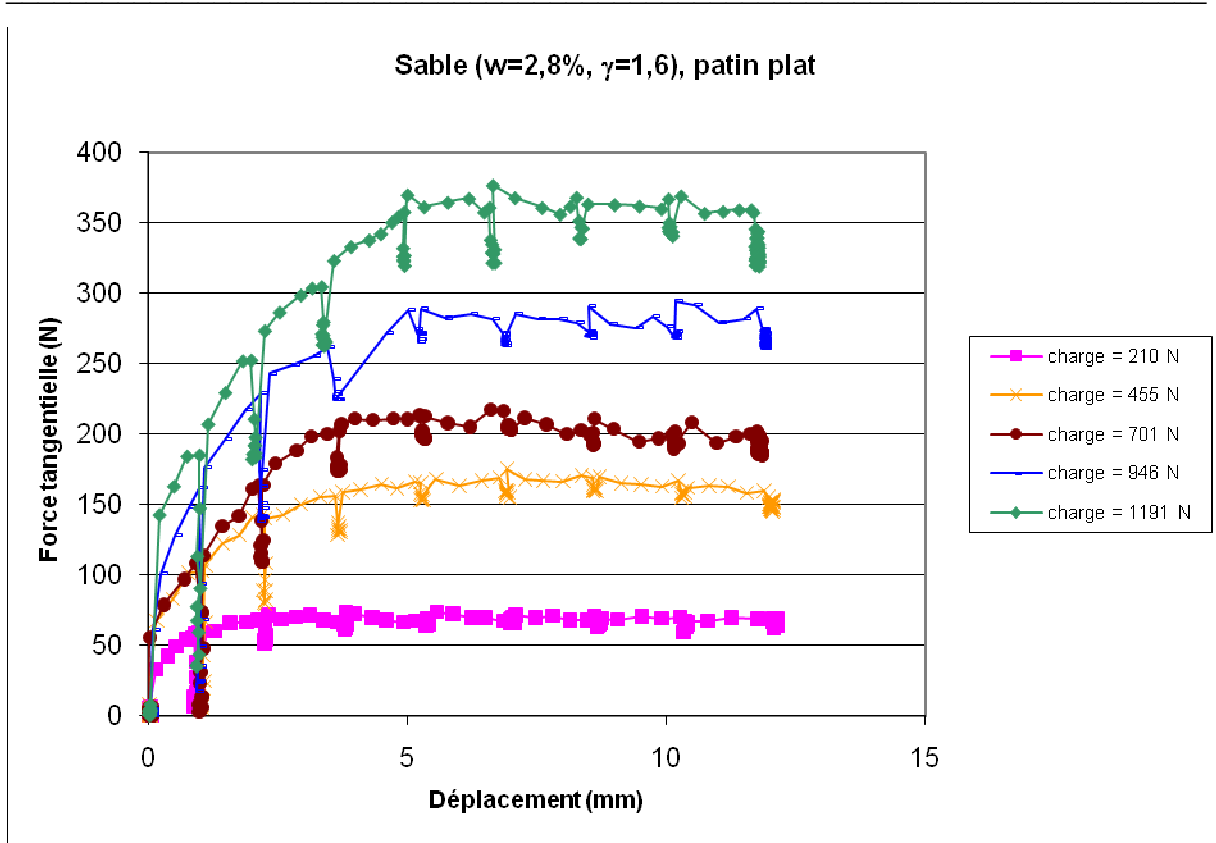




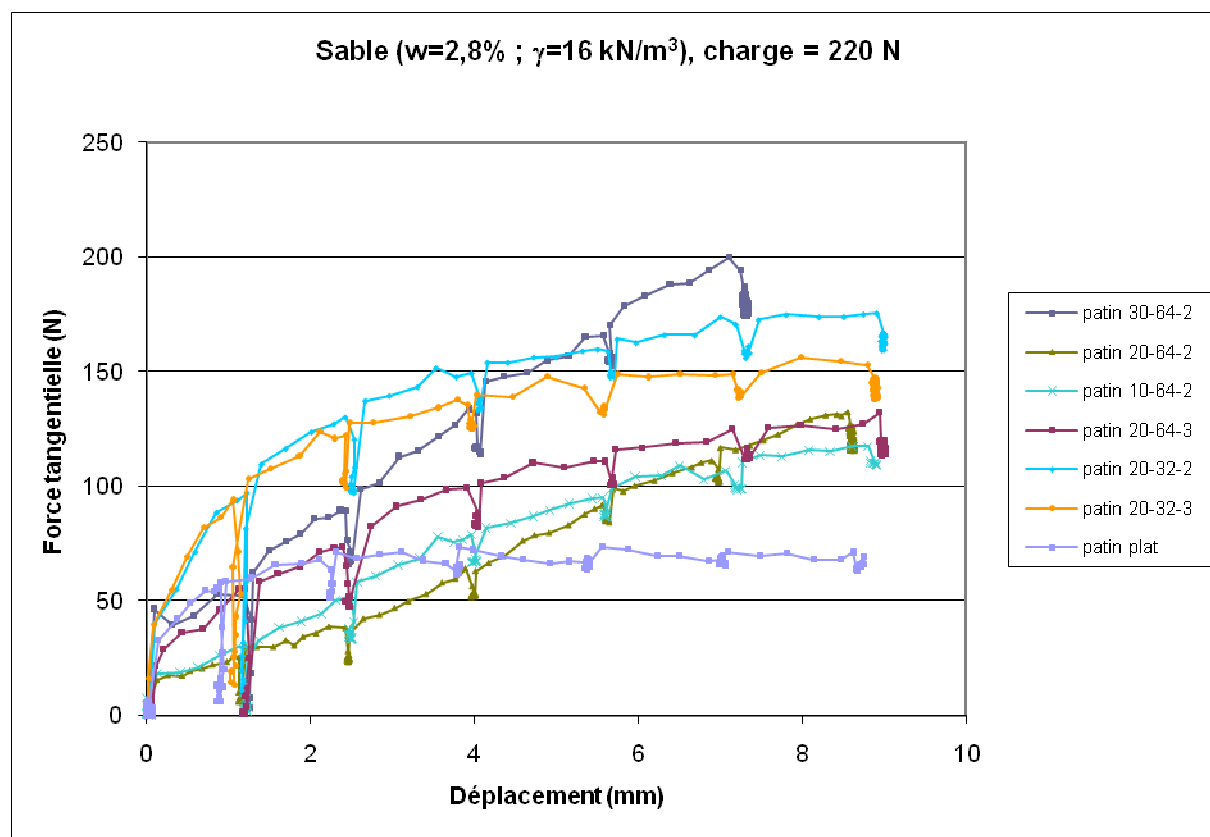


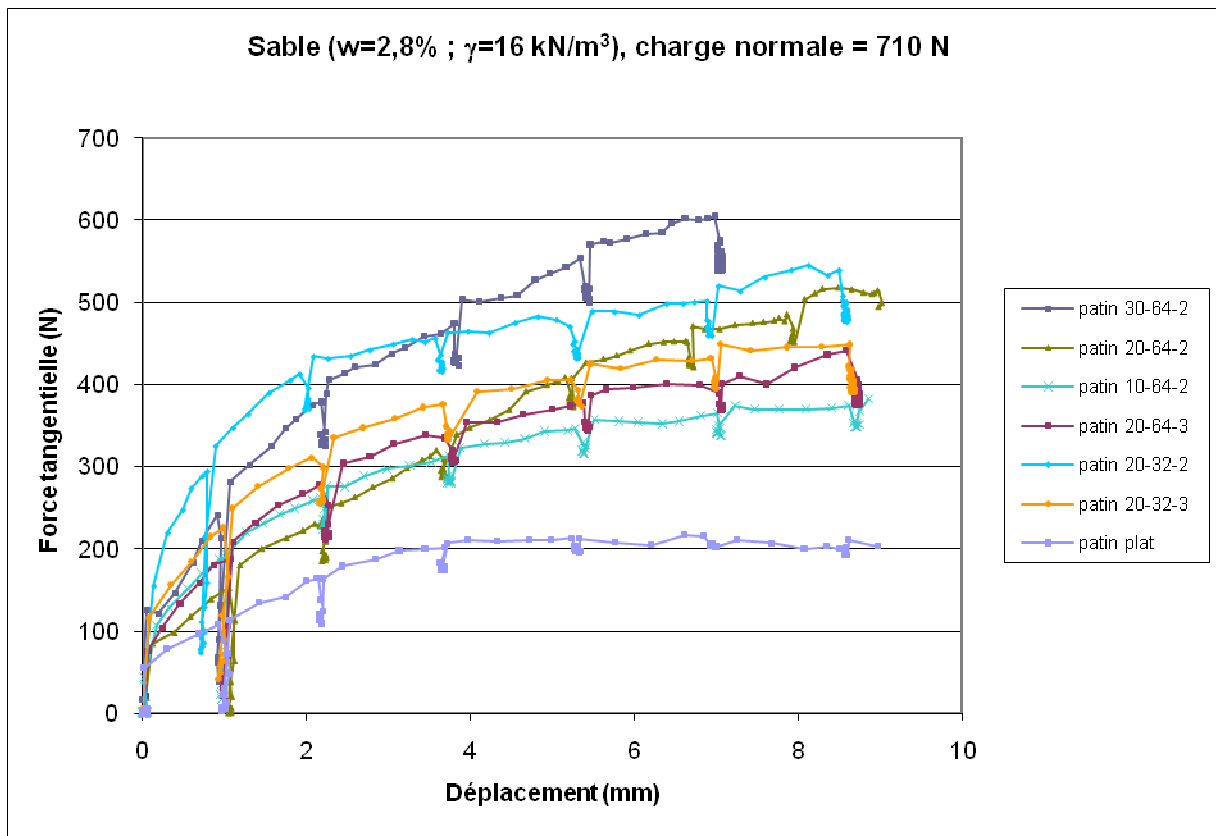
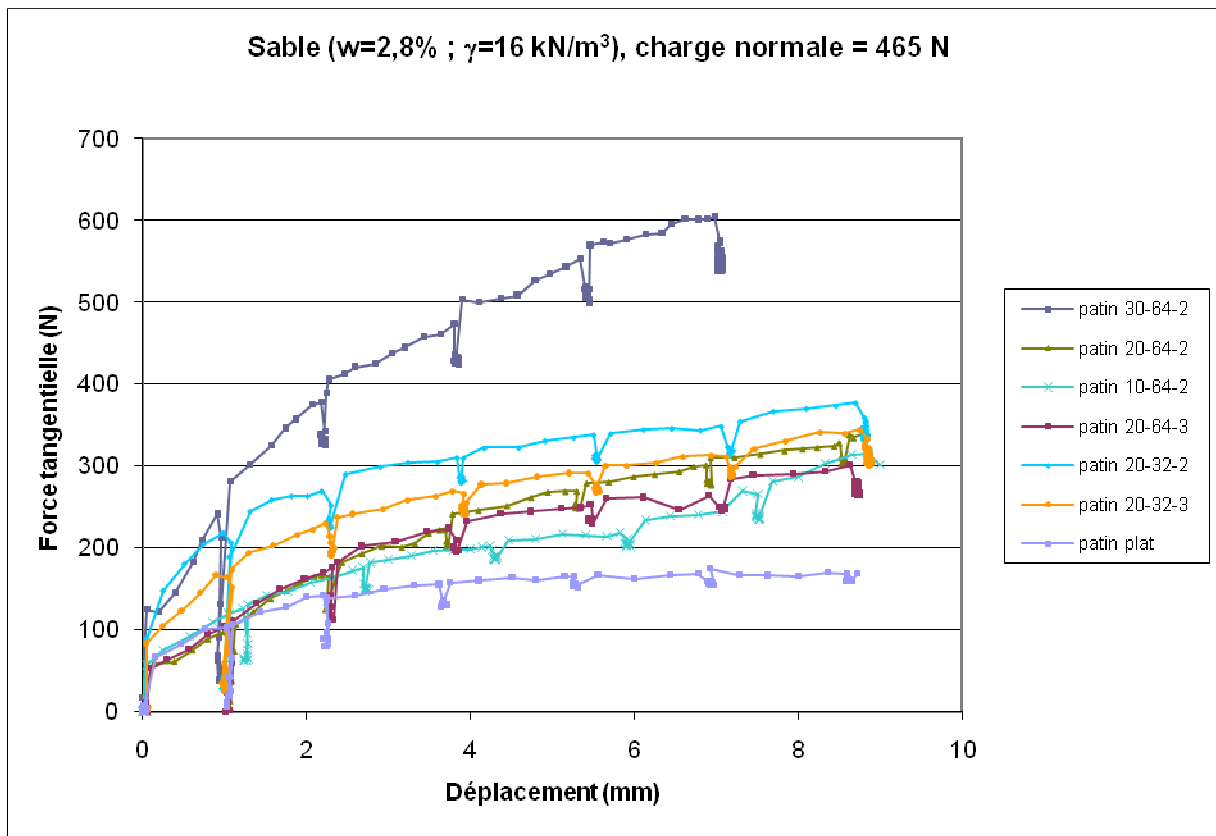


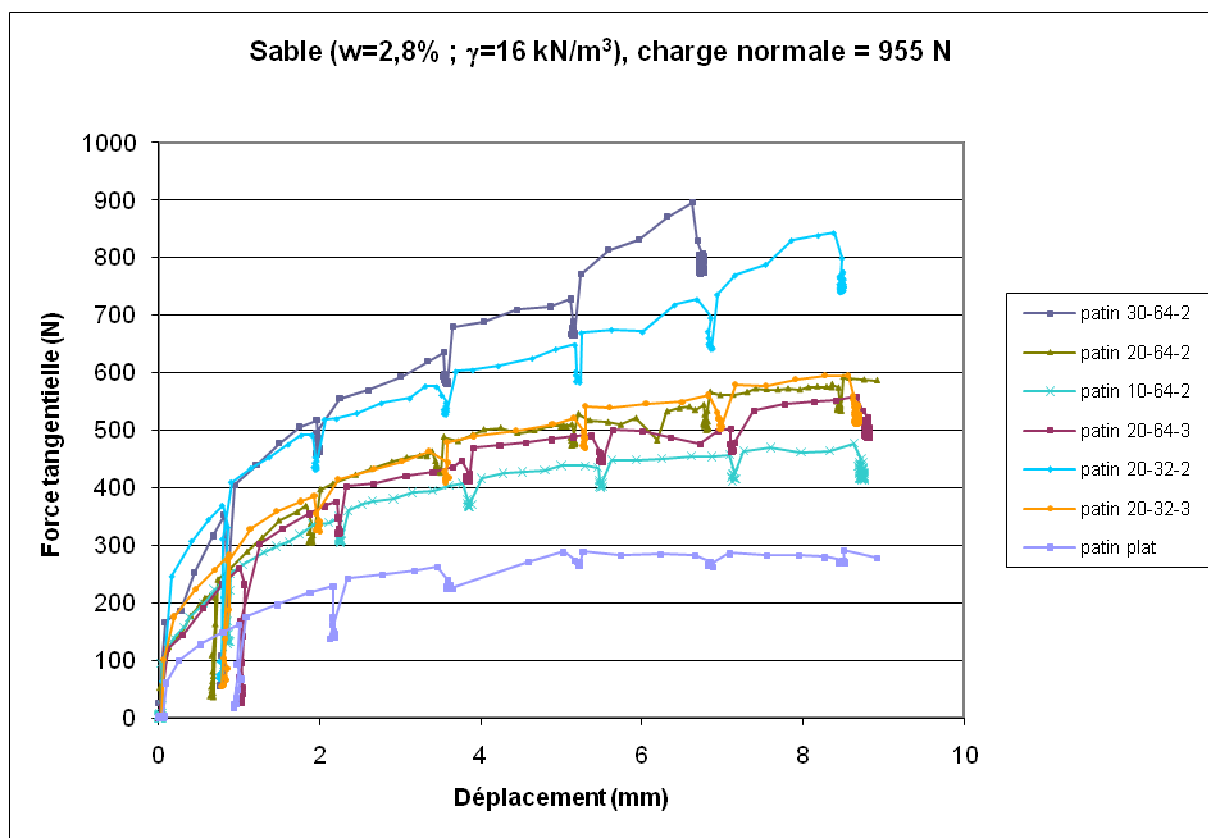


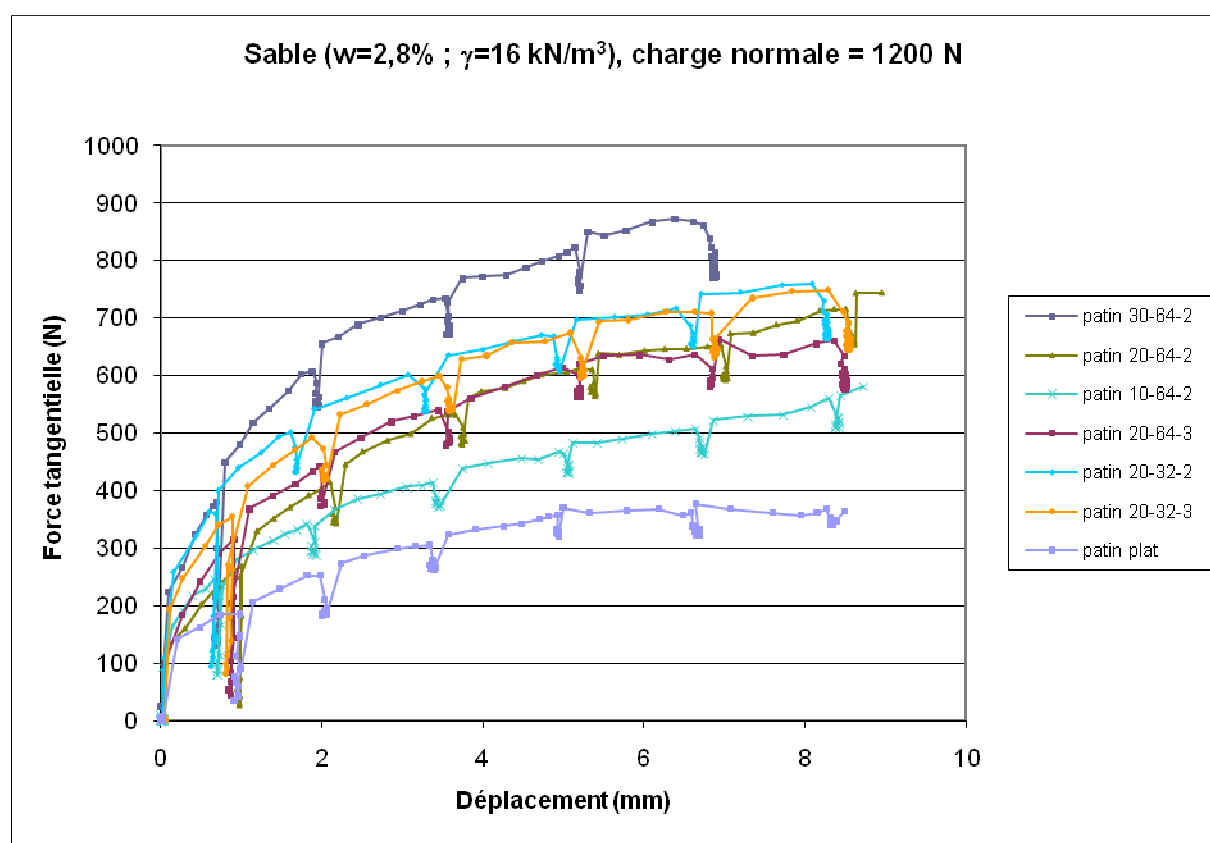


D-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée

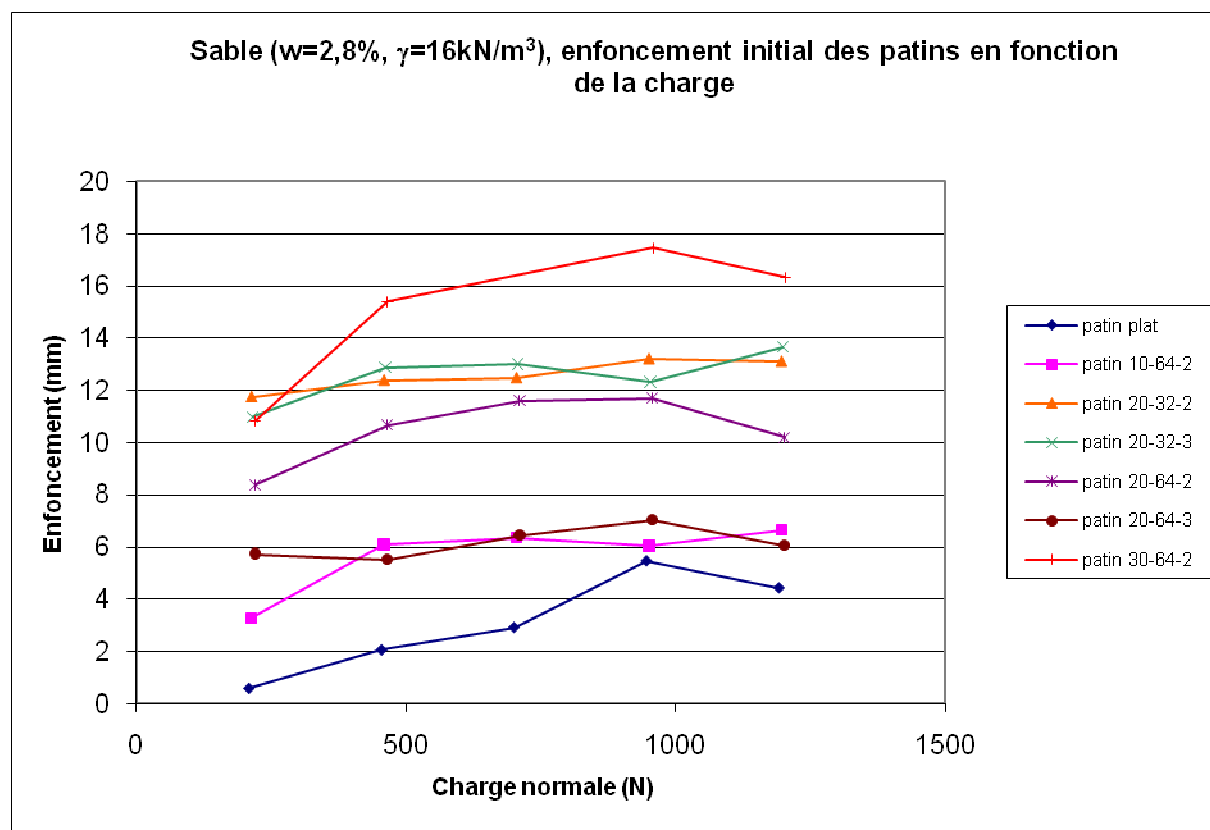






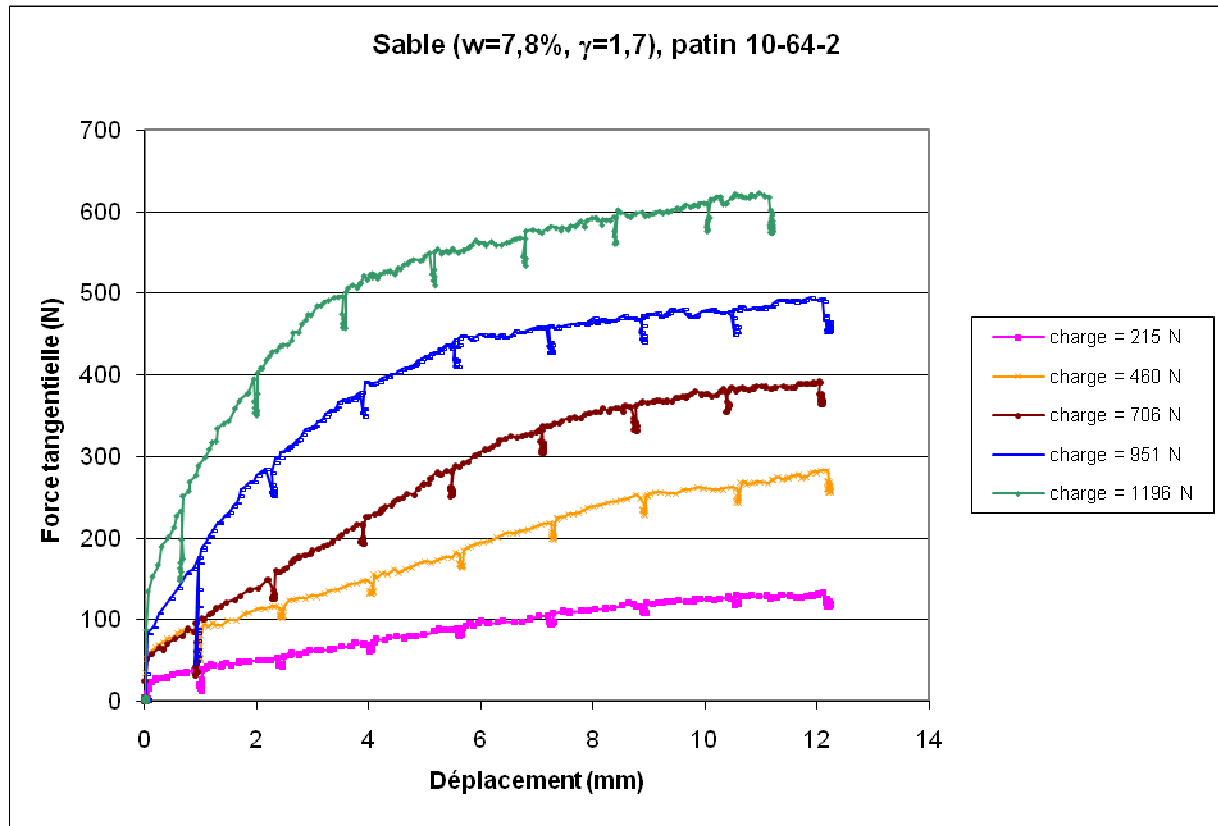


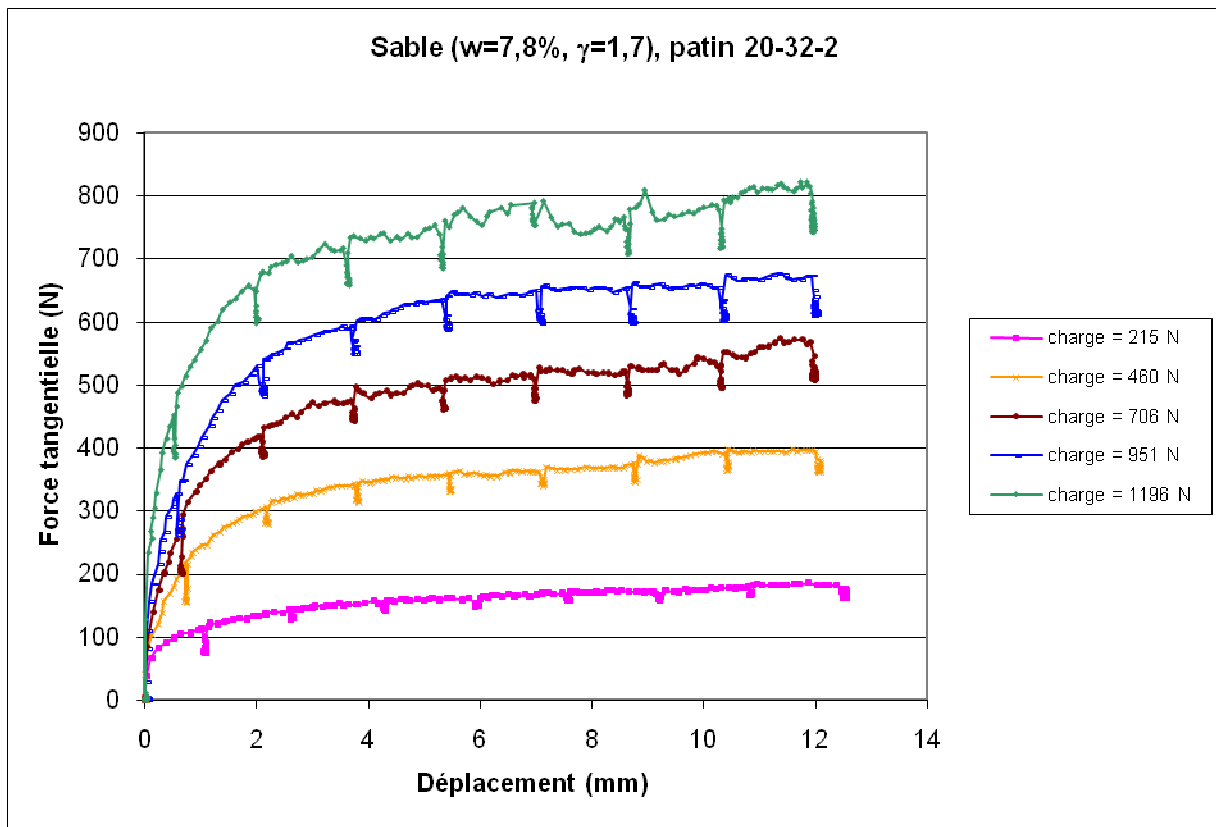
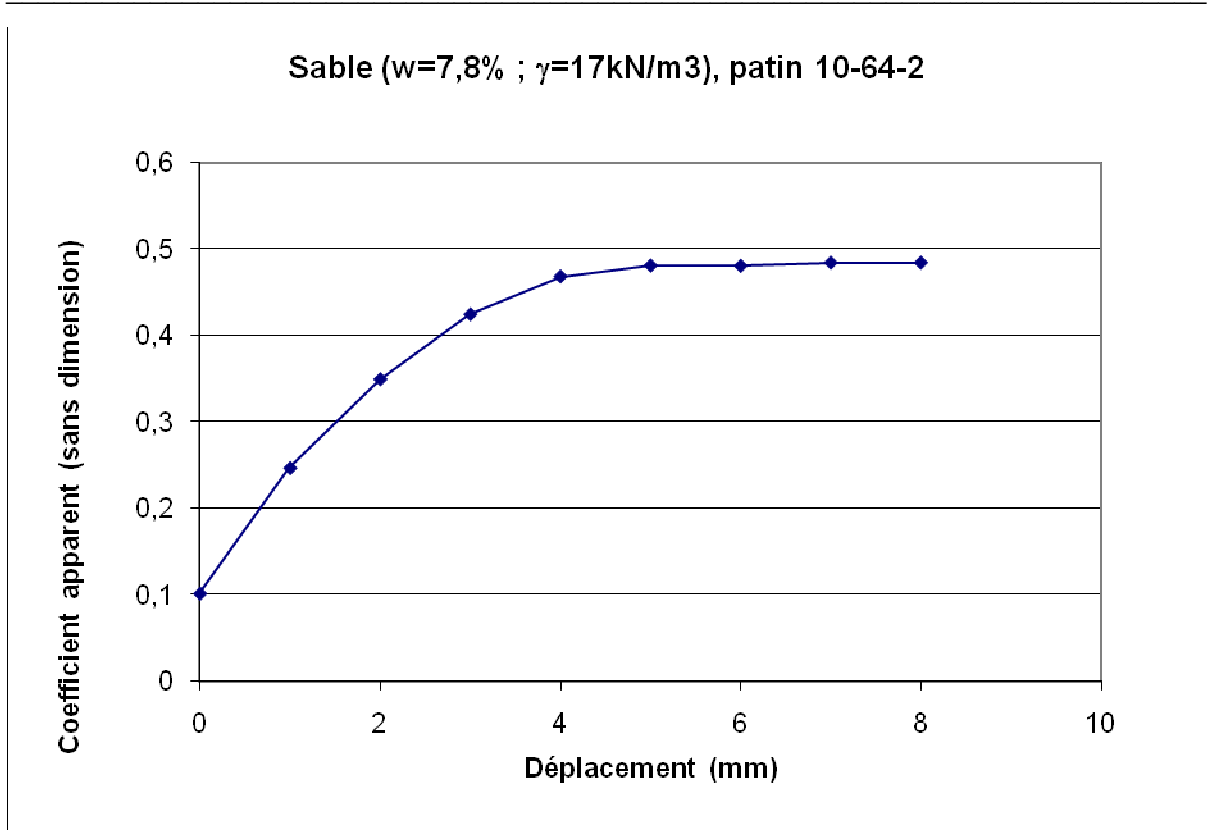
D-3 : Données d'enfoncement

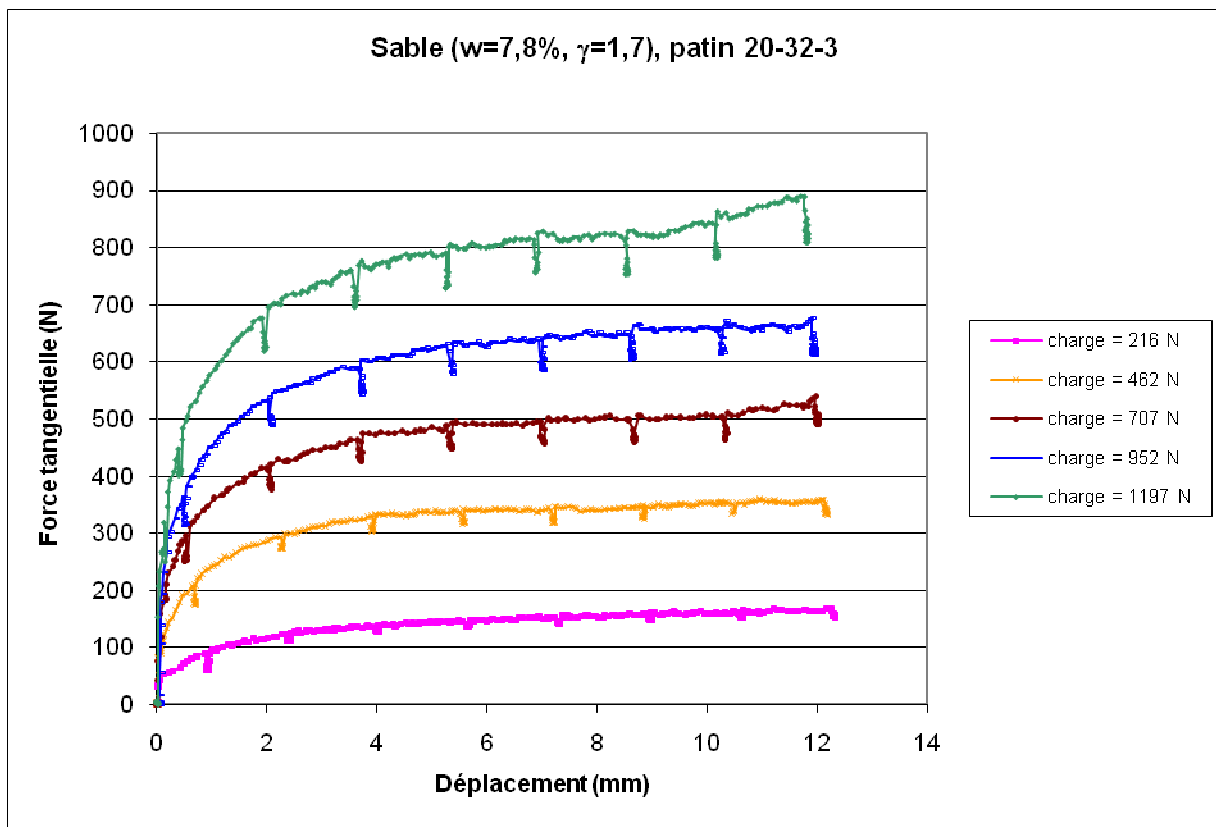
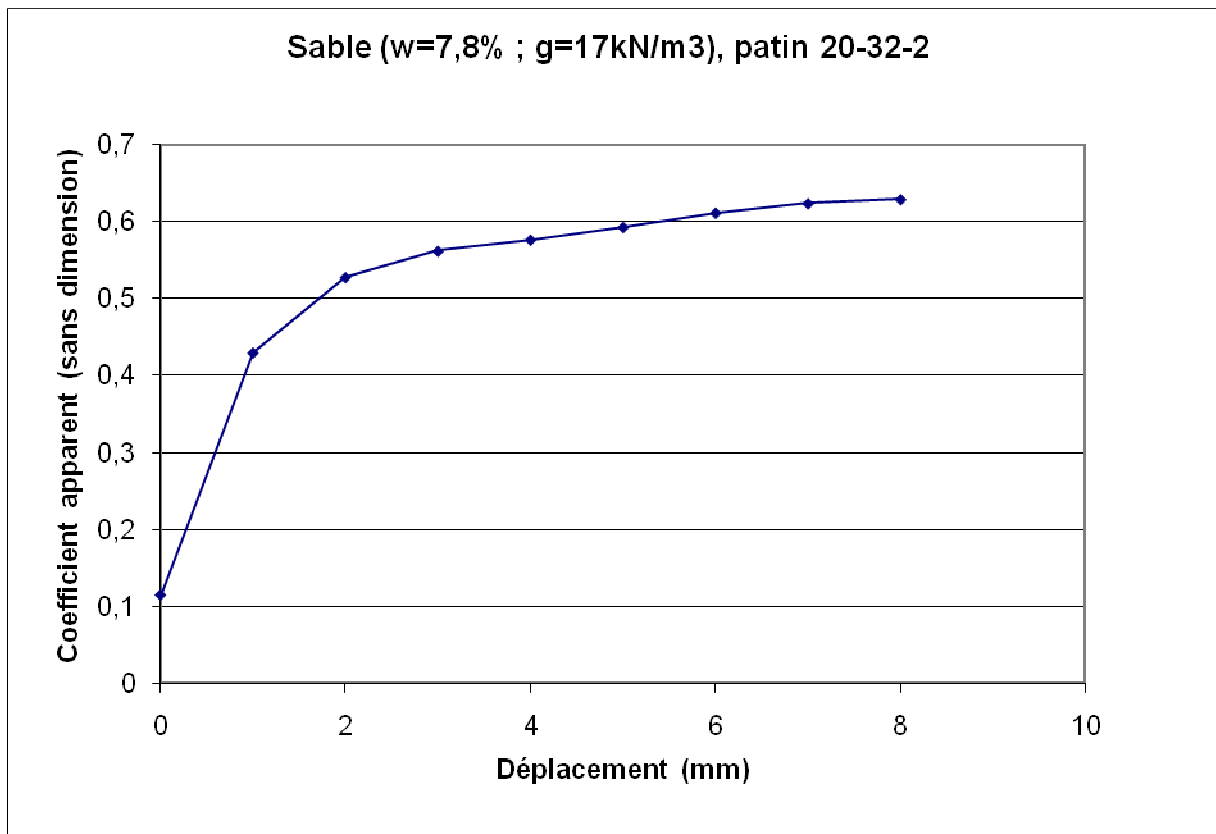


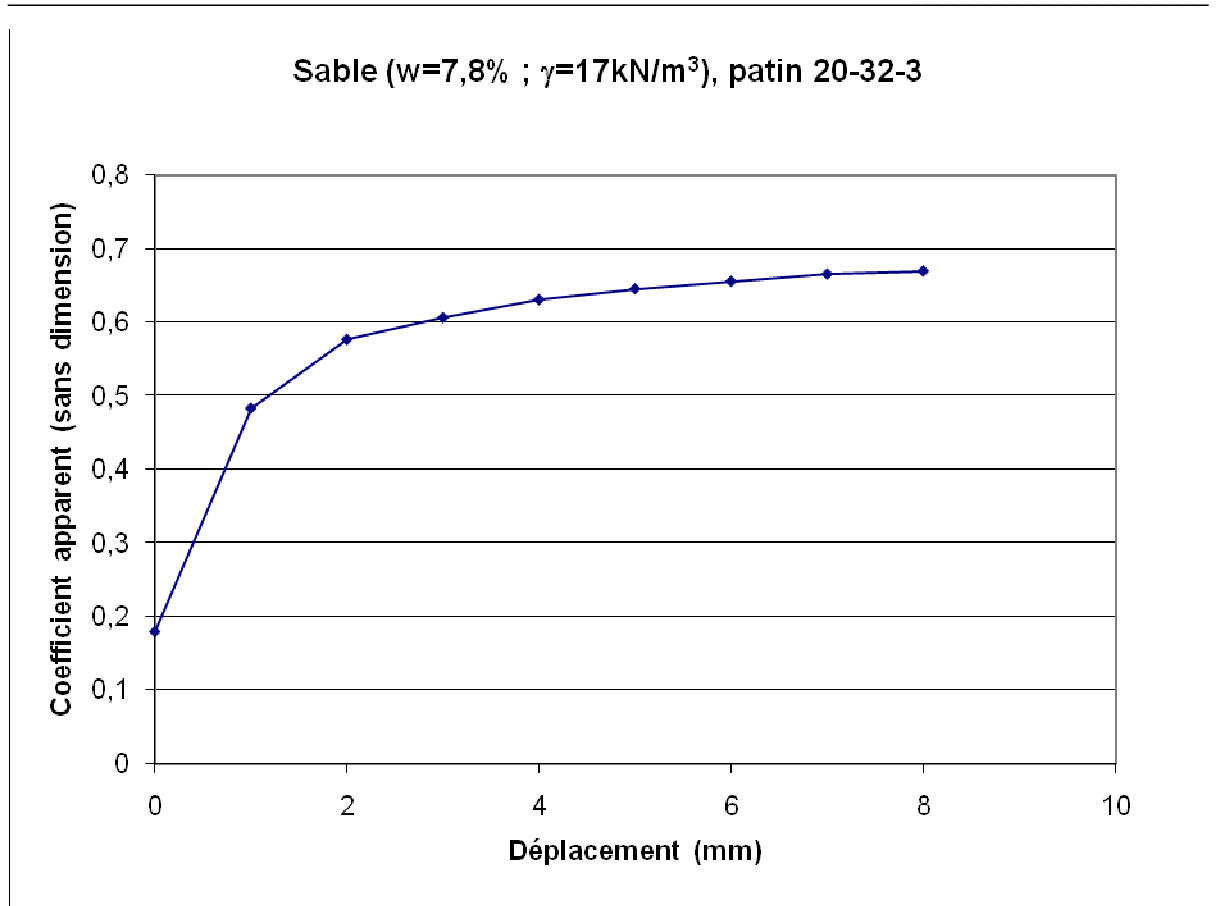
Annexe E : Essais réalisés sur le sable dense

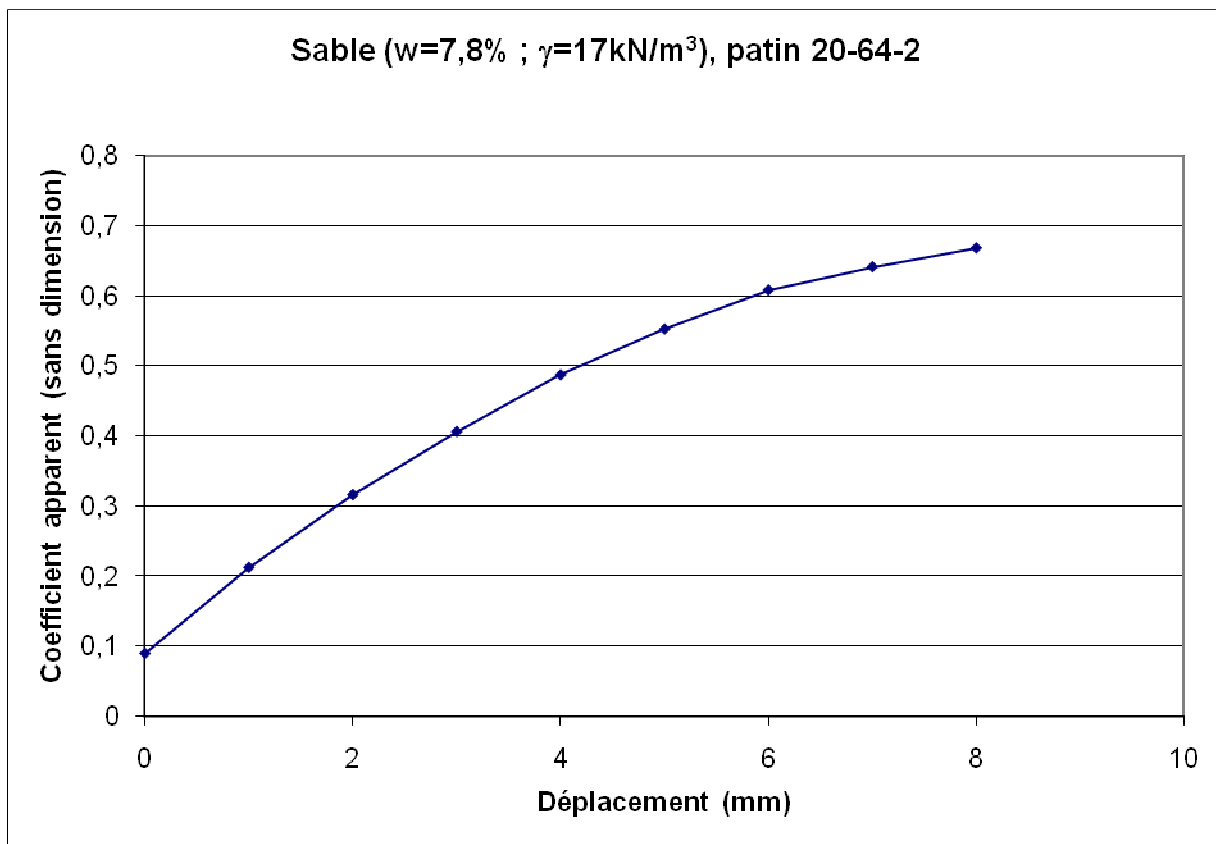
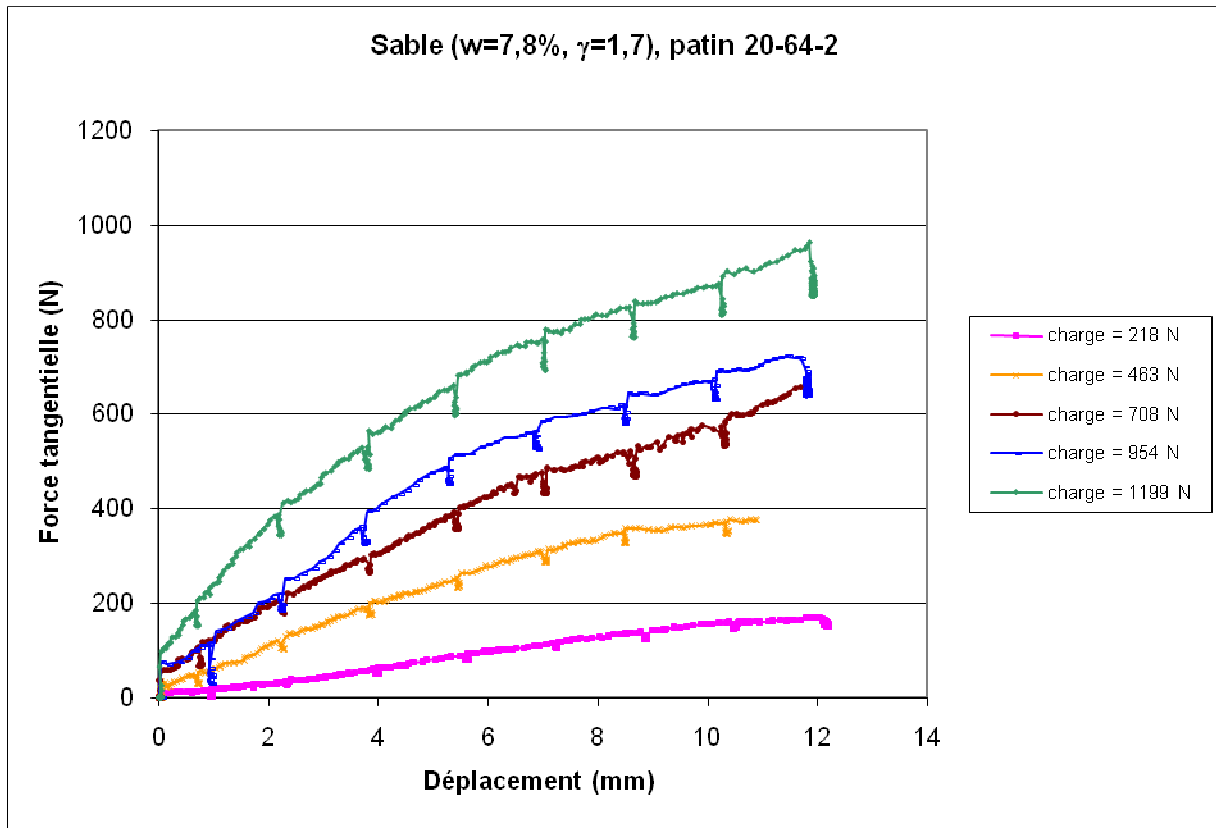
E-1 : Données des essais et calcul des coefficients

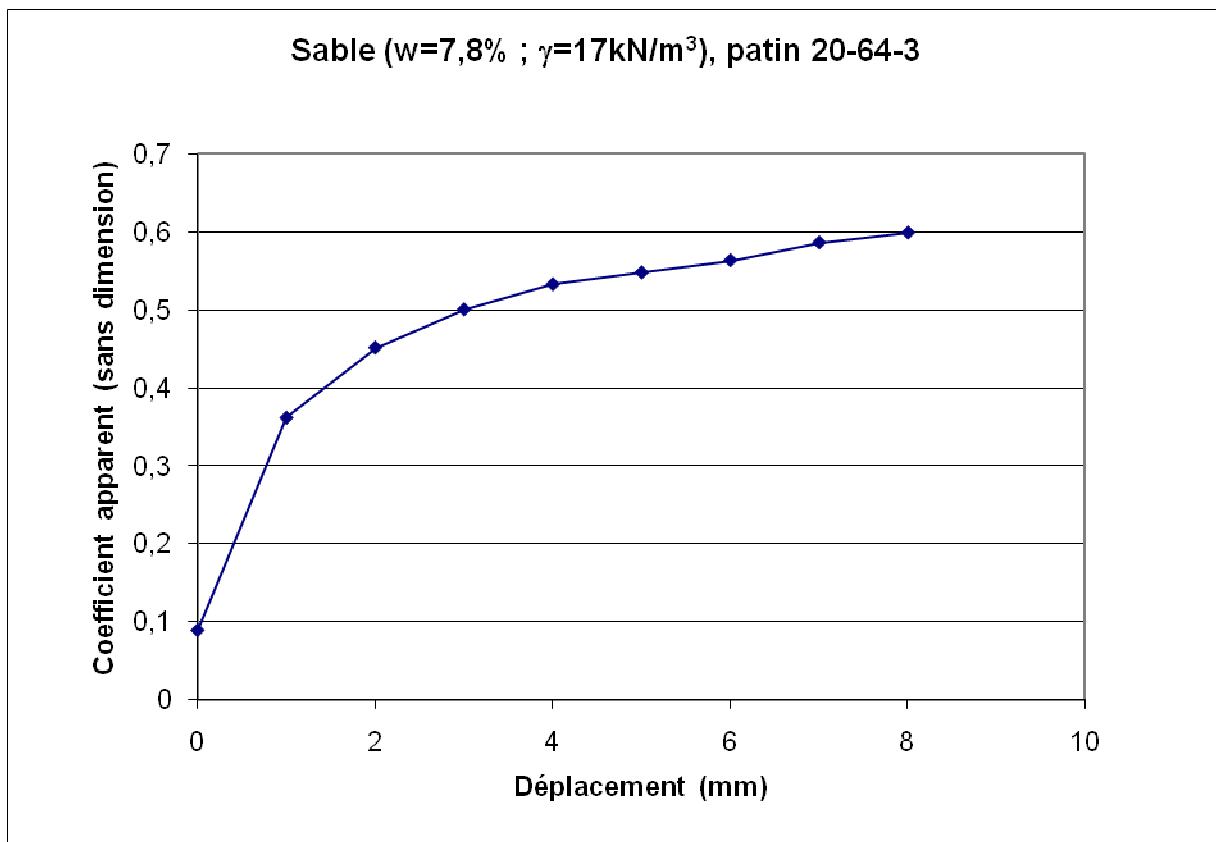
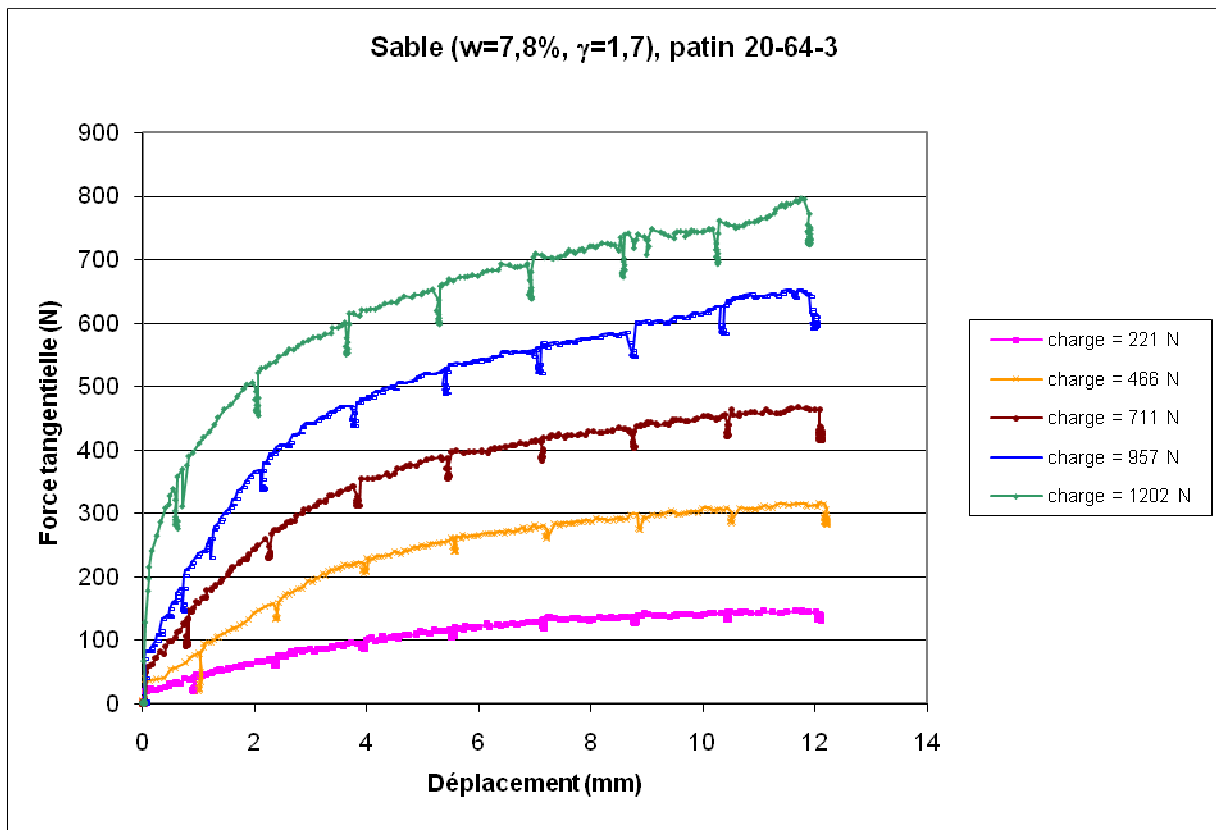


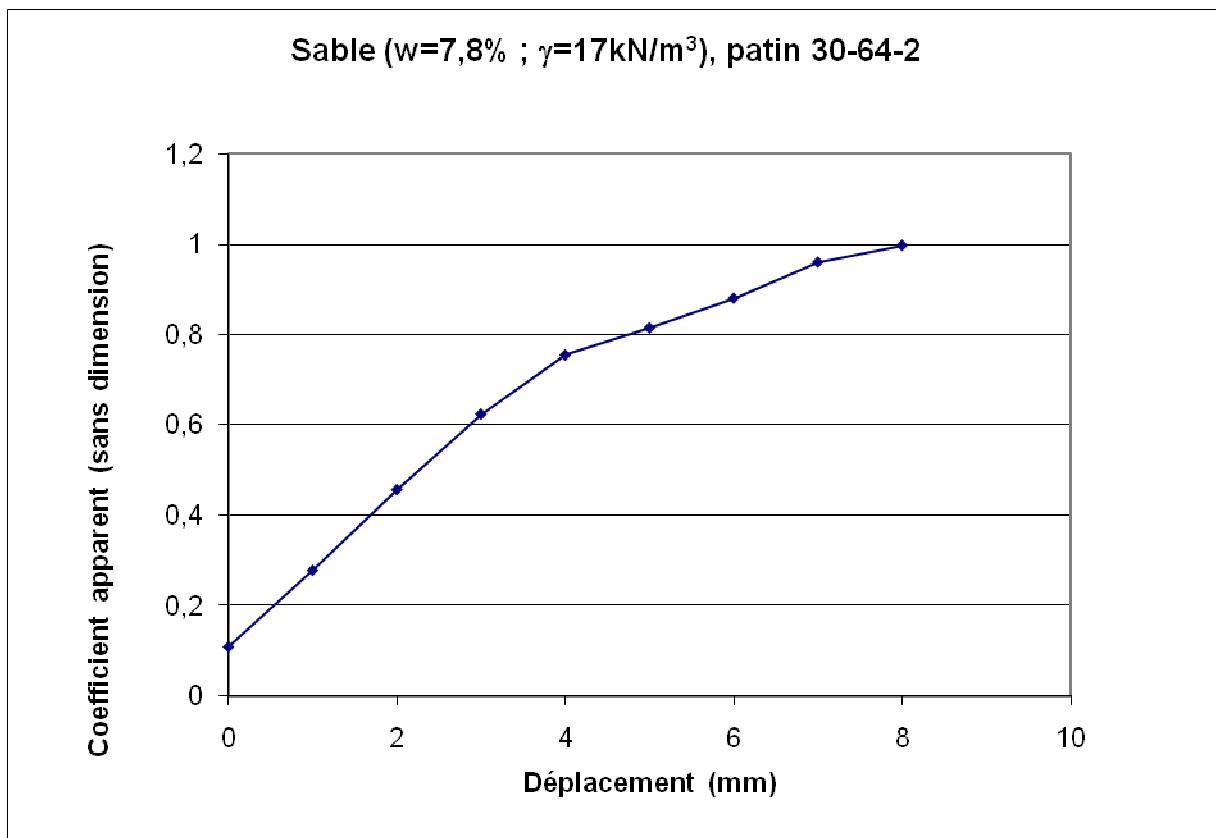
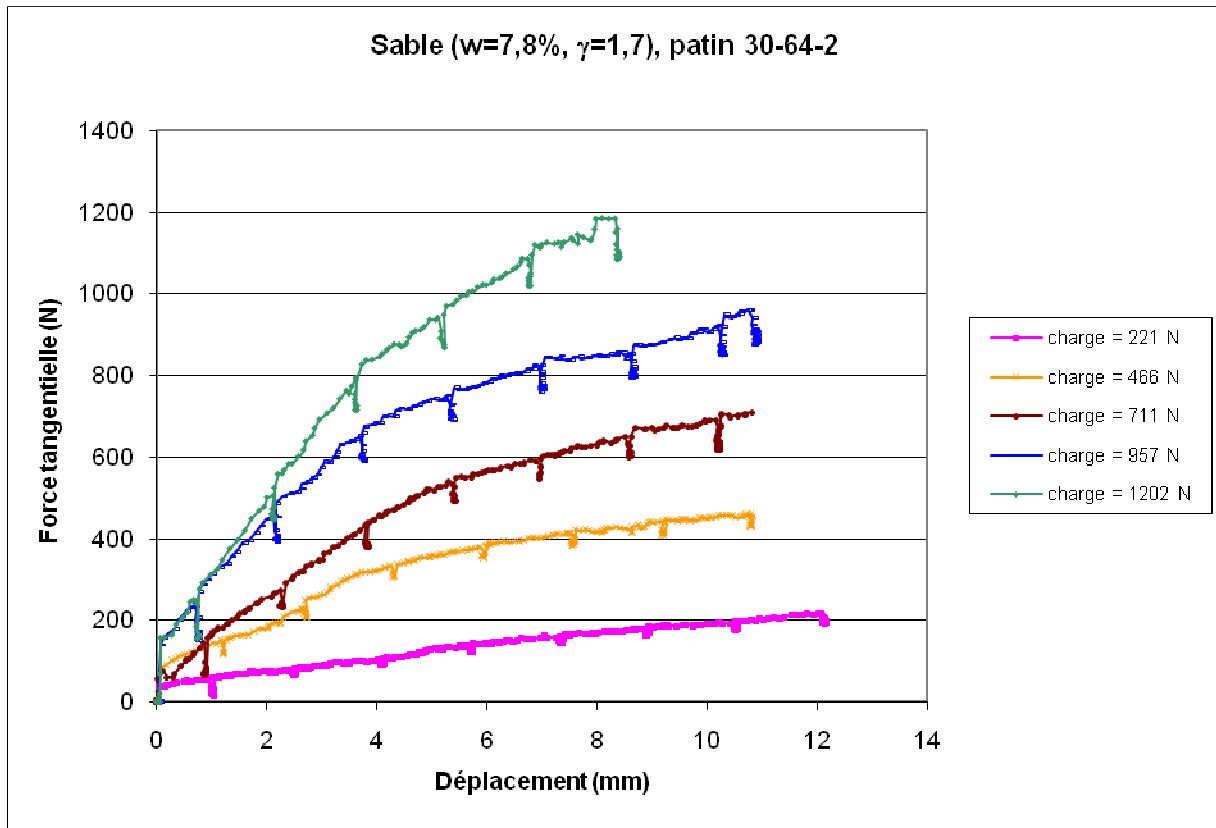


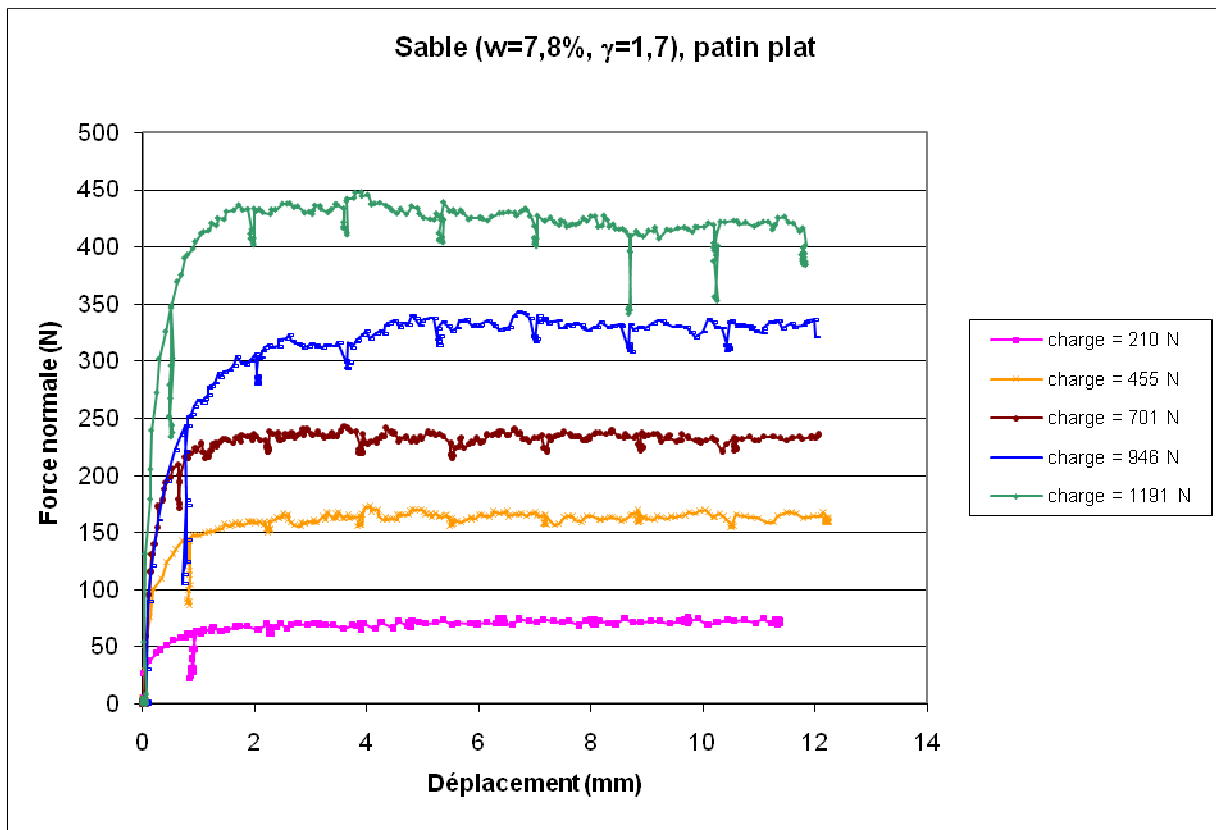




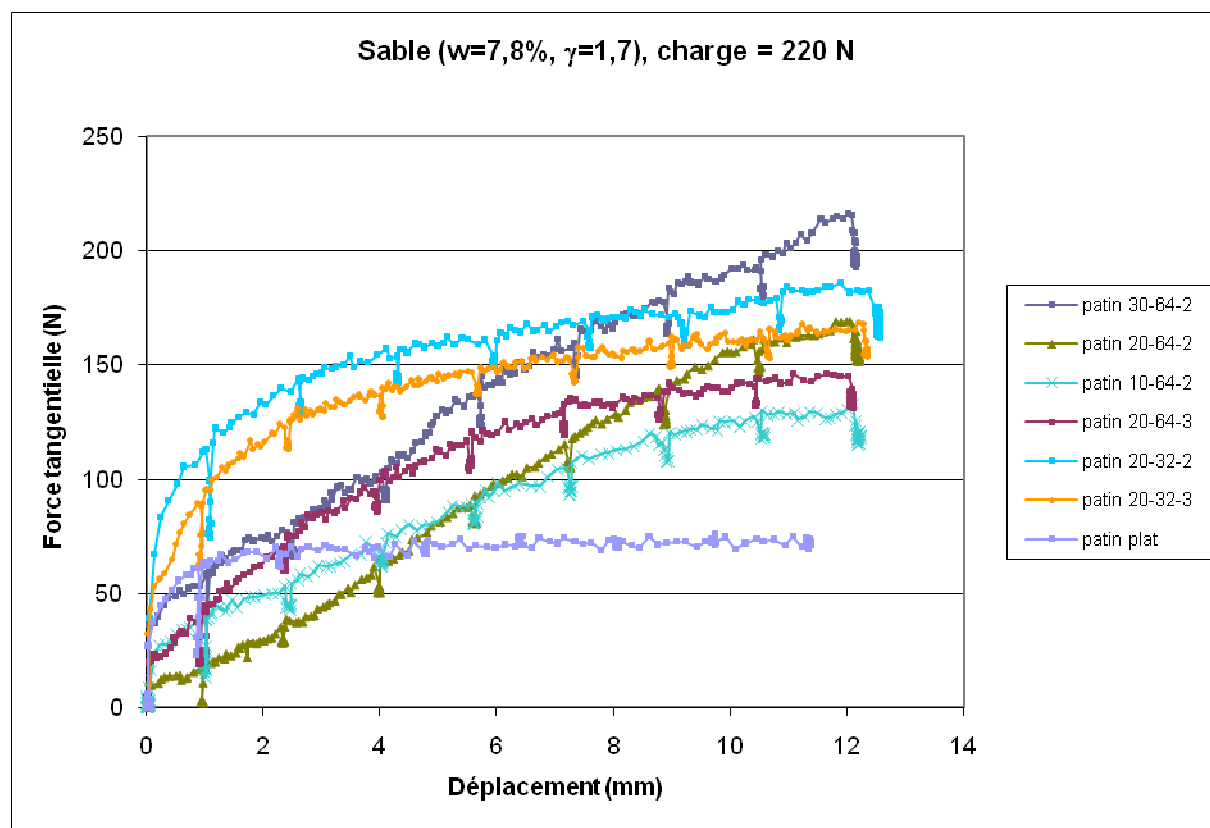


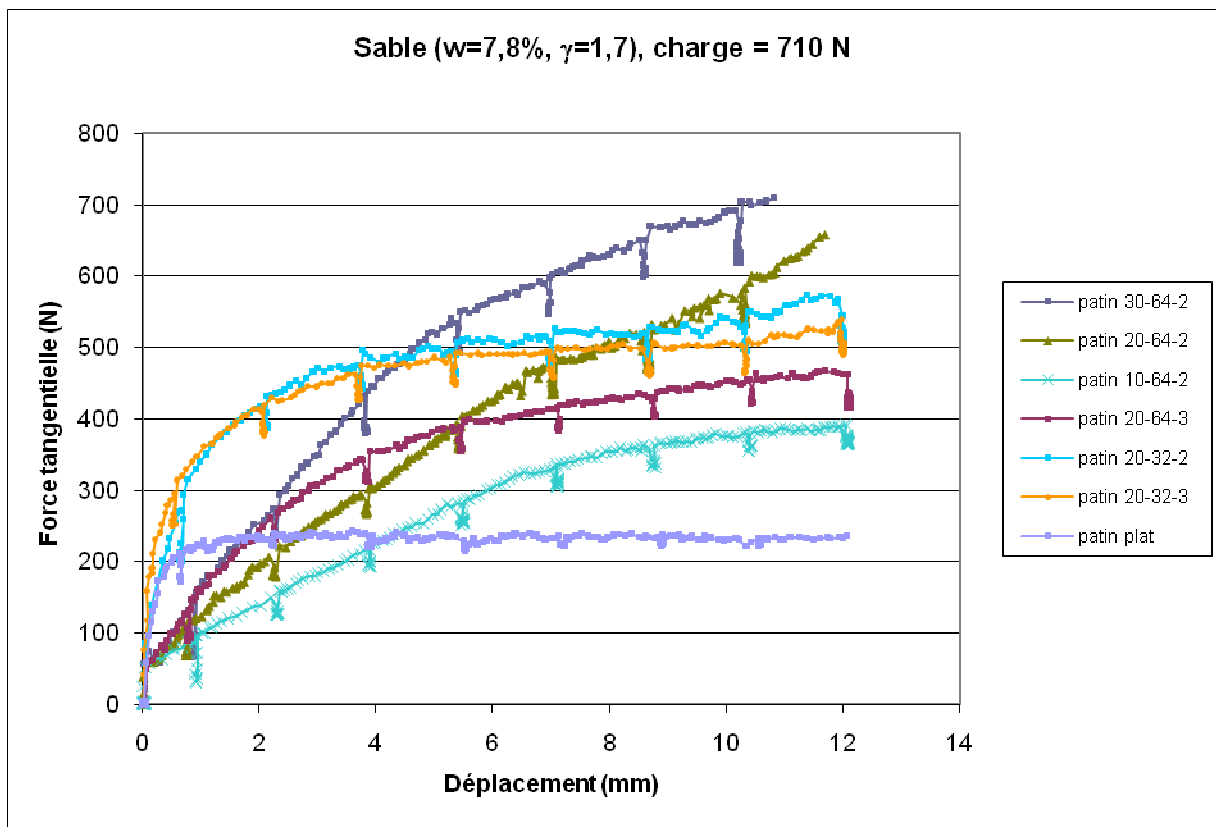
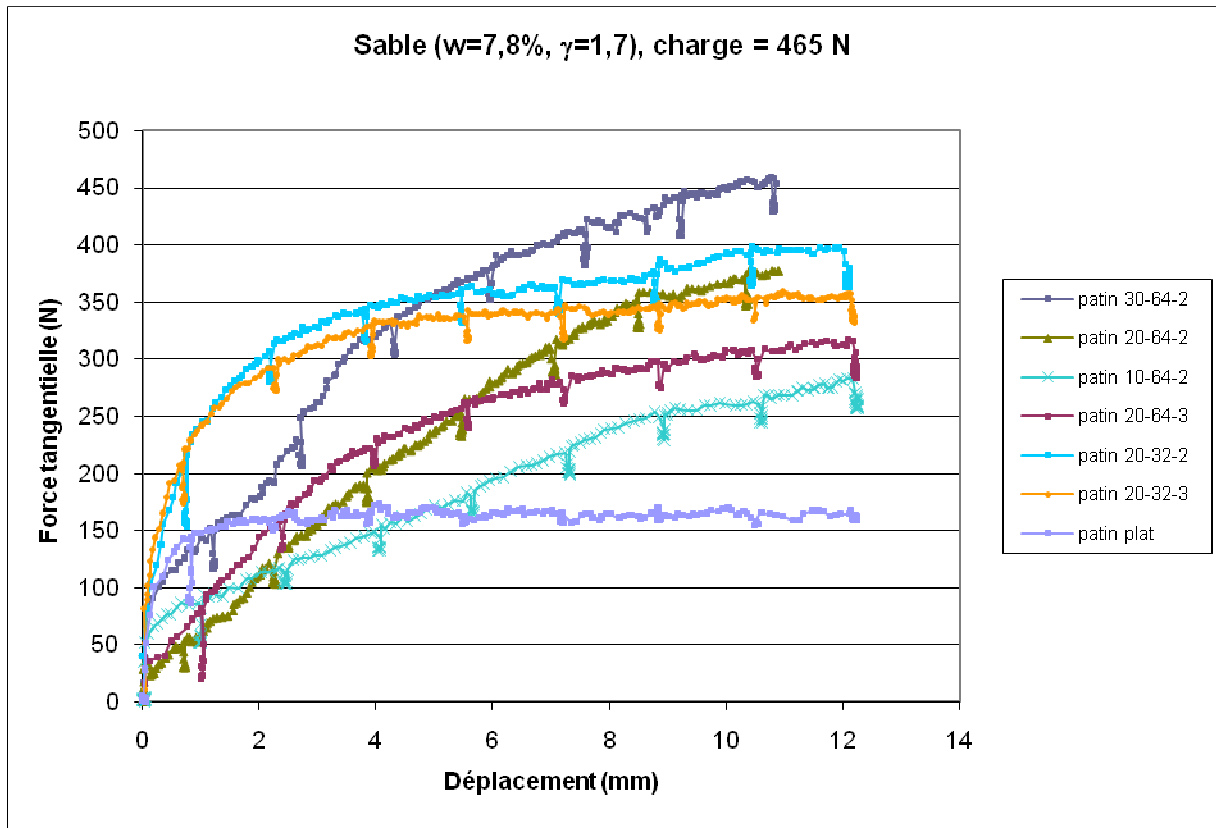


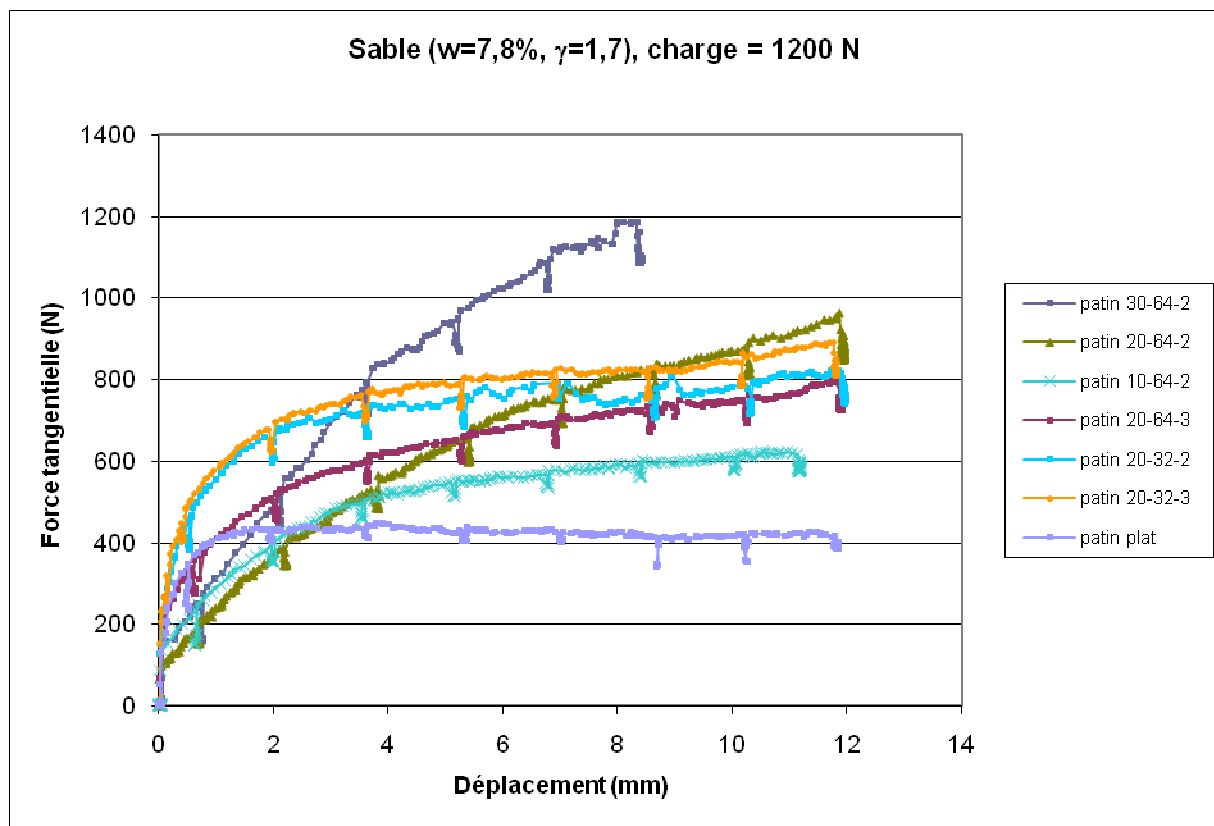
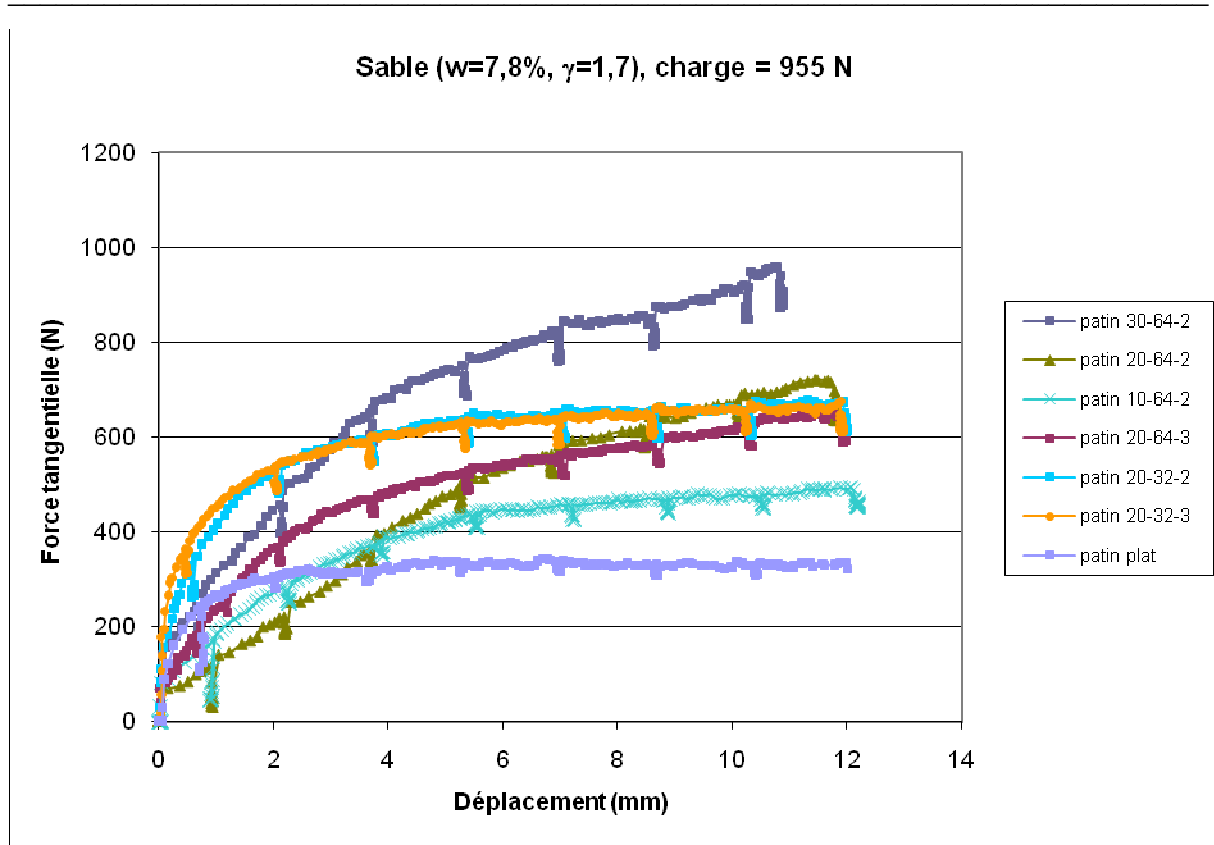




E-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée







E-3 : Données d'enfoncement

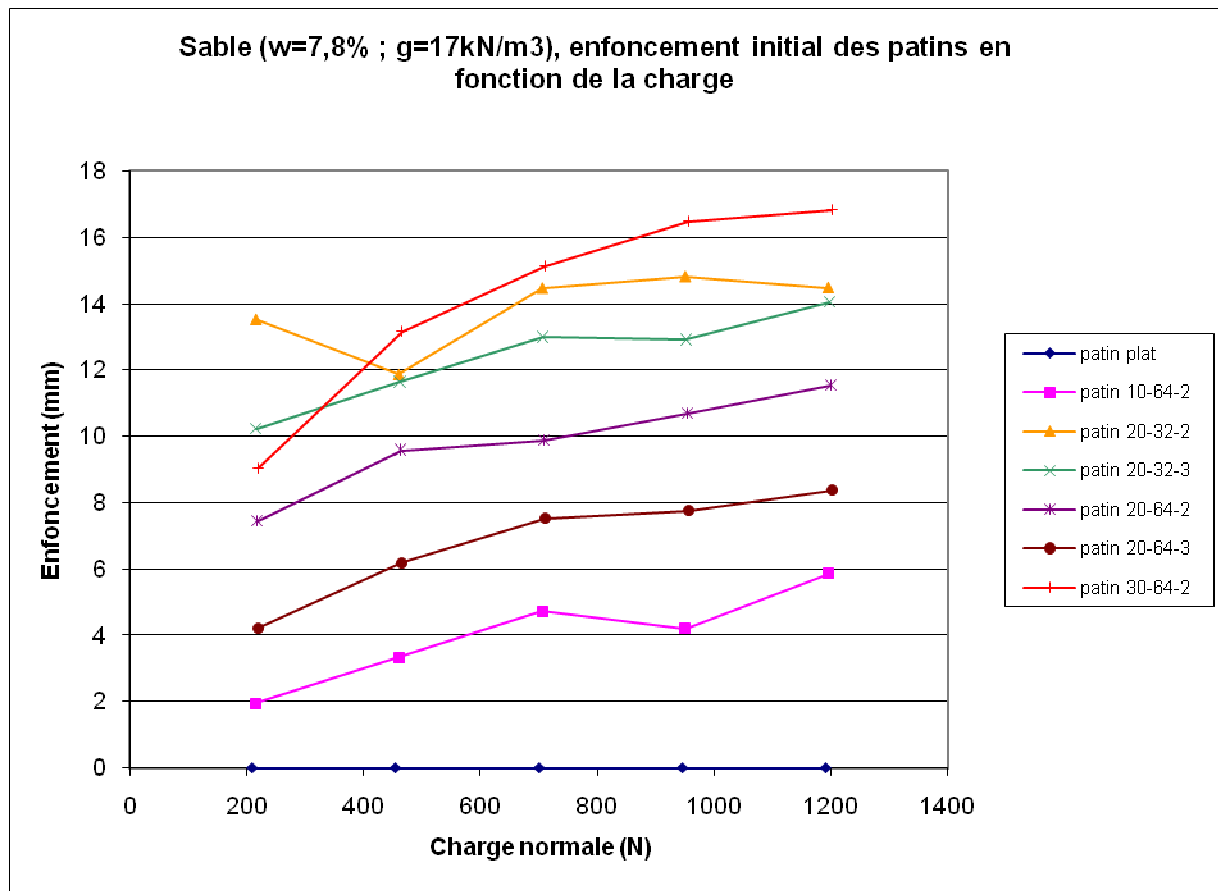


Table des matières

Résumé	3
Remerciements	4
Introduction	5
1. Présentation du projet	6
1.1. La paroi moulée.....	6
1.1.1. Description	6
1.1.2. Inconvénients du procédé.....	7
1.2. Le projet SCOUT	8
1.3. Le projet TRACI – le sujet du travail d’option	11
2. Les essais	12
2.1. Objectif des essais	12
2.2. Description des essais.....	14
2.2.1. Le montage et le protocole	14
2.2.2. Les différents patins testés	18
2.2.3. Les différents matériaux testés.....	21
2.3. Les résultats.....	24
2.3.1. Tests effectués sur le calcaire.....	24
2.3.2. Tests effectués sur l’argile.....	31
2.3.3. Tests effectués sur le sable.....	37
2.3.4. Conclusion sur le sable.....	45
2.4. Conclusion des essais	46
3. Dimensionnement du module de poussée.....	47
3.1. Le raisonnement	47
3.2. Étude statique	49
3.3. Dimensionnement des grippeurs	55
3.3.1. Stabilité en butée de la tranchée.....	55
3.3.2. Design et dimensions des grippeurs	58
3.4. Nouveau design du module de poussée et gain de poids	62
Conclusion.....	64
Bibliographie.....	66
Annexes	68
Annexe A : Plan des patins	71
Annexe B : Essais réalisés sur le calcaire	81
B-1 : Données des essais et calcul des coefficients.....	81
B-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée.....	89

B-3 : Données d'enfoncement.....	94
B-4 : Données des essais sur le calcaire mouillé.....	95
Annexe C : Essais réalisés sur l'argile	97
C-1 : Données des essais et calcul des coefficients.....	97
C-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée.....	105
C-3 : Données d'enfoncement.....	108
C-4 : Données des essais sur l'argile mouillée.....	109
Annexe D : Essais réalisés sur le sable lâche	113
D-1 : Données des essais et calcul des coefficients	113
D-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée.....	120
D-3 : Données d'enfoncement.....	124
Annexe E : Essais réalisés sur le sable dense.....	125
E-1 : Données des essais et calcul des coefficients.....	125
E-2 : Comparaison des patins à charge normale fixée	134
E-3 : Données d'enfoncement.....	137
Table des matières.....	138
Index des figures.....	140
Index des graphiques	141
Index des tableaux.....	142

Index des figures

Figure 1-1 : Construction d'une paroi moulée	6
Figure 1-2 : Phases de creusement des panneaux (a : panneaux primaires ; b : panneaux secondaires).....	7
Figure 1-3 : Concept de la machine du projet SCOUT	8
Figure 1-4 : Le prototype du projet SCOUT	9
Figure 2-1 : Vue de haut du prototype du projet SCOUT ; (1) grippeurs arrières, (2) grippeurs avants.....	12
Figure 2-2 : Bilan des forces sur le grippeur.....	13
Figure 2-3 : Dispositif expérimental des essais (vue globale)	14
Figure 2-4 : Dispositif expérimental des essais, vue rapprochée (a. avant la mise en charge ; b. durant l'acquisition)	15
Figure 2-5 : Patin profilé testé lors du projet SCOUT	18
Figure 2-6 : Exemple de patin testé lors des essais	19
Figure 2-7 : Les six patins profilés testés (a. 10-64-2 ; b. 20-64-2 ; c. 30-64-2 ; d. 30-64-3 ; e. 20-32-2 ; f. 20-32-3).....	20
Figure 2-8 : Définition de l'angle β d'un pic	20
Figure 2-9 : Essai sur du calcaire de Saint-Leu (a. avant mise en charge ; b. après l'essai ; c. détail sur l'enfoncement du pic après mise en charge ; d. détail sur l'endommagement du calcaire après essai).....	24
Figure 2-10 : Trois profils d'enfoncement du patin en fonction du déplacement.....	25
Figure 2-11 : Essai sur de l'argile de Provins (a. avant mise en charge ; b. après l'essai ; c. détail sur l'enfoncement du pic après l'essai ; d. détail sur l'endommagement de l'argile après essai)	31
Figure 2-12 : Deux profils d'enfoncement du patin en fonction du déplacement.....	32
Figure 2-13 : Essai sur du sable (a. avant mise en charge ; b. après mise en charge ; c. après l'essai ; d. empreinte du patin dans la boîte).....	37
Figure 3-1 : Vue de haut du prototype du projet SCOUT ; schéma des forces.....	47
Figure 3-2 : Diagramme du schéma de raisonnement pour dimensionner le module de poussée (en rouge : paramètre à déterminer par une étude ; en vert : paramètres à calculer)	48
Figure 3-3 : Prototype imaginé du projet TRACI (à gauche) à partir du prototype du projet SCOUT (à droite).....	49
Figure 3-4 : Phases de fonctionnement du prototype TRACI.....	51
Figure 3-5 : Equilibre des forces lors de la phase d'abattage.....	52
Figure 3-6 : Rupture 2D d'une tranchée soumise à une contrainte exercée par une plaque	55
Figure 3-7 : Contrainte maximale à appliquer pour éviter la rupture des parois de la tranchée	57
Figure 3-8 : Rupture 3D d'une tranchée soumise à une contrainte exercée par une plaque	58
Figure 3-9 : Articulation des grippeurs sur le prototype du projet SCOUT.....	59
Figure 3-10 : Deux conceptions différentes pour les grippeurs (a. minimiser la surface ; b. simplifier le mécanisme)	59
Figure 3-11 : Masse des différents grippeurs sur le prototype du projet SCOUT	62

Index des graphiques

Graphique 2-1 : Courbe obtenue lors d'un essai	16
Graphique 2-2 : Résultats des essais de cisaillement à la boîte sur l'argile de Provins	21
Graphique 2-3 : Résultats des essais de cisaillement à la boîte sur le sable (à densité et teneur en eau fixée)	22
Graphique 2-4 : Enfoncement initial des patins dans du calcaire de Saint-Leu en fonction de la charge normale	26
Graphique 2-5 : Résultats des essais du patin 20-64-2 sur du calcaire de Saint-Leu avec différentes charges normales	27
Graphique 2-6 : Courbe $F_t = f(F_n)$ pour le patin 20-64-2 sur le calcaire sec	28
Graphique 2-7 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le calcaire sec	29
Graphique 2-8 : Variation du coefficient de frottement sur le calcaire en fonction de l'angle d'attaque des pics	29
Graphique 2-9 : Enfoncement initial des patins dans l'argile de Provins en fonction de la charge normale	32
Graphique 2-10 : Résultats des essais du patin 20-64-2 sur du calcaire de Saint-Leu avec différentes charges normales	33
Graphique 2-11 : Courbes $F_t = f(F_n)$ pour le patin 10-64-2 sur l'argile	34
Graphique 2-12 : Coefficients de frottement apparents des patins sur l'argile humide	35
Graphique 2-13 : Variation du coefficient de frottement sur l'argile en fonction de l'angle d'attaque des pics	35
Graphique 2-14 : Enfoncement initial des patins dans le sable en fonction de la charge normale	38
Graphique 2-15 : Résultats des essais du patin 20-32-3 sur du sable lâche avec différentes charges normales	39
Graphique 2-16 : Coefficient de frottement apparent du patin 20-32-3 sur du sable lâche en fonction du déplacement du patin	40
Graphique 2-17 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable lâche en fonction du déplacement du patin	41
Graphique 2-18 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable dense en fonction du déplacement du patin	42
Graphique 2-19 : Variation du coefficient de frottement sur le sable en fonction de l'angle d'attaque des pics	45

Index des tableaux

Tableau 1-1 : Matrice des résultats du prototype du projet SCOUT.....	10
Tableau 2-1 : Grandeurs mesurées et acquises lors d'un essai	16
Tableau 2-2 : Récapitulatif des caractéristiques géométriques des patins	20
Tableau 2-3 : Caractéristiques du sable testé	22
Tableau 2-4 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le calcaire sec	28
Tableau 2-5 : Comparaison des coefficients de frottement apparent sur le calcaire sec et mouillé.....	30
Tableau 2-6 : Coefficients de frottement apparents des patins sur l'argile humide.....	34
Tableau 2-7 : Comparaison des coefficients de frottement apparents sur l'argile humide et l'argile détrempee.....	36
Tableau 2-8 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable lâche à 5mm de déplacement.....	40
Tableau 2-9 : Coefficients de frottement apparents des patins sur le sable dense à 5mm de déplacement.....	42
Tableau 2-10 : Coefficients de frottement des patins avec $\beta=47^\circ$ sur le sable	46
Tableau 3-1 : Paramètres du calcul de butée de la tranchée.....	56
Tableau 3-2 : Dimensionnement des grippeurs en cas de fonctionnement normal de la machine	60
Tableau 3-3 : Dimensionnement des grippeurs en cas de perte de boue.....	60
Tableau 3-4 : Masses des éléments du module de poussée du prototype du projet SCOUT, ancien et nouveau design.....	63