

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON**

**INSTITUT NATIONAL DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE,
Laboratoire d'Agronomie
Grignon**

T H E S E

présentée par Isabelle COULOMB

Ingénieur Agronome

pour l'obtention du titre de :

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

**ANALYSE QUANTITATIVE DU COMPORTEMENT DU SOL
AU LABOUR :
ROLE DE L'ETAT STRUCTURAL INITIAL**

A N N E X E S

***Soutenue le 20 décembre 1991 devant la Commission d'Examen
composée de :***

M. Sebillotte, Professeur d'Agronomie, INA-PG
D. Picard, Directeur IRAT-CIRAD
C. Cheverry, Professeur de Science du Sol, ENSA, Rennes
H. Manichon, Directeur Scientifique CIRAD
M. Aubineau, Professeur de Machinisme Agricole, INA-PG
J. Boiffin, Directeur Station INRA Laon

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

LISTE DES ANNEXES

II.A1 : Techniques photographiques	p. 1
II.A2 : Morphologie mathématique	p. 7
II.A3 : Evaluation des erreurs faites sur les mesures de surface au cours de la chaîne de traitements	p. 11
II.A4 : Analyse de la variabilité de l'humidité pour le calcul de la densité du sol avec la sonde gamma	p. 19
II.B1 : Test de sensibilité du calcul des indices des vides avec d'autres valeurs de densité Δ et Γ	p. 23
II.C1 : Test d'un effet date d'observation	p. 29
II.C2 : Relation mesure de surface d'un objet-mesure de longueur de l'objet	p. 33
III.A1 : Test du χ^2 entre distributions surfaciques des calibres avant labour dans NT	p. 35
III.B1 : Test du χ^2 entre distributions surfaciques des calibres après labour	p. 37
III.B2 : Réanalyse de la distribution des calibres après labour dans les traitements tassés avec des classes de 1cm d'étendue	p. 41
III.C1 : Test du χ^2 entre distributions en nombre obtenues avant et après labour, et pour des vitesses différentes	p. 43
IV.A1 : Calculs mécaniques intermédiaires simples	p. 47
IV.A2 : Calcul et analyse des propriétés des fonctions H_i intervenant dans l'analyse de l'effort	p. 49
IV.D1 : Caractéristiques complémentaires et photographies des systèmes tracteur-outil et des appareils de mesures utilisés	p. 53
"Analyses statistiques descriptives"	p. 62

* *

*

ANNEXE II.A1 : Techniques photographiques

La réalisation de documents photographiques implique le choix :

- d'un matériel photographique :
 - * appareil photographique,
 - * objectif,
 - * obturateur ;
- des réglages de l'appareil :
 - * distance,
 - * ouverture du diaphragme,
 - * vitesse ;
- de l'éclairage ;
- du point de vue ;
- du film ; c'est-à-dire de l'émulsion sensible pour le tirage négatif ;
- du papier sensible pour le tirage positif ;
- des accessoires : parasoleil, pied, traitement antireflet.

Nous avons choisi de confier le développement et le tirage des épreuves à un photographe qui opère de manière standard donc nous ne maîtrisons pas ces deux opérations. Il faut demeurer conscient qu'elles ont une influence non négligeable sur le résultat final obtenu.

A. MATERIEL PHOTOGRAPHIQUE

I. Choix de l'appareil photographique

Nous avons cherché à :

- éviter les erreurs de parallaxe liées à une différence entre l'axe optique de visée et l'axe optique de l'objectif en utilisant un appareil à visée réflexe monoobjectif où les deux axes sont confondus ; un miroir renvoie l'image vers le haut de l'appareil pendant la visée et il s'escamote juste au moment de la prise de vue ;
- avoir un appareil de bonne qualité mais conservant une mobilité et une rapidité opératoire, soit un appareil reflex 24 x 36 ; nous n'avons pas choisi un appareil professionnel à magasin interchangeable bien qu'il s'agisse d'appareils de grande qualité mécanique et optique avec des possibilités de mouvement (système à bascule) permettant de conserver le plan du film en position verticale car :
 - * nous ne changeons pas d'émulsion afin que toutes les prises de vue soient comparables ;
 - * il s'agit d'appareils :
 - peu mobiles et d'installation longue ;
 - de réglage délicat ;
 - dont l'intérêt est essentiellement de contrôler la profondeur de champ alors que nous cherchons à avoir un objet le plus plan possible ;
 - de prix coûteux et fragiles alors que les risques de détérioration sur le terrain sont importants.

II. Choix de l'objectif

L'objectif doit être muni d'un système de lentilles permettant une bonne correction des aberrations de la lentille :

- chromatique : les rayons sont d'autant plus réfractés que leur longueur d'onde est courte ;
- sphérique : la lentille est plus réfringente sur ses bords que sur son centre ;
- sphéricité centrale : le faisceau incident incliné sur l'axe donne des images étirées en forme d'aigrette et non plus en forme de points ;
- astigmatisme : il est impossible d'obtenir une image ponctuelle d'un objet situé en dehors de l'axe optique ;
- courbure de champ : l'image d'un plan perpendiculaire à l'axe optique est une calotte sphérique ;
- distorsions : la lentille ne projette pas identiquement les rayons centraux et les rayons obliques.

L'objectif Olympus que nous avons choisi est, d'après le constructeur particulièrement bien corrigé, grâce à un dispositif de sept lentilles en six groupes.

Le pouvoir séparateur de l'objectif doit être considéré avec celui de l'émulsion choisie.

Nous devons avoir un pouvoir séparateur au moins égal à celui de l'oeil (0.1 mm ?). Nous ne connaissons pas le pouvoir séparateur de l'objectif utilisé mais nous savons qu'un très bon appareil a un pouvoir de séparation de 100 traits par mm, c'est à dire 0.01 mm.

Si l'on veut distinguer deux mottes séparées par une fissure de 0.5 mm, il faut avec un agrandissement de $\times 0.06$ (Cf. choix de cette valeur à la fin du paragraphe) un pouvoir séparateur supérieur à 34 traits par mm ; s'il s'agit de distinguer des objets de 0.1 mm, il faut 167 traits par mm.

Une émulsion :

- normale a un pouvoir de 90 à 115 traits par mm ;
- lente a un pouvoir de 150 traits par mm environ mais l'emploi d'une telle émulsion était exclue dans notre cas car la luminosité naturelle est insuffisante (Cf.choix du film).

Pour un reflex 24 x 36, le format du négatif est 24 x 36 mm. Le diamètre du cercle d'image nette dépend alors de la distance focale. Celle-ci contribue à la détermination de la taille de l'objet représenté sur la photo. L'autre paramètre est l'éloignement du sujet.

Pour des raisons pratiques (taille de la fosse), il n'est guère envisageable d'avoir une distance de mise au point supérieure à 1.50 m. Pour représenter 60 cm sur 36 cm (une seule photo doit permettre de couvrir l'ensemble du profil verticalement), il faut donc une focale $F < (36/600) * 1500 / ((36/600)+1) \Rightarrow F < 84.9$ mm.

Pour un format 24 x 36 mm, la diagonale du format est 43.1 mm, aussi la focale normale est 45 voire 50 mm.

La profondeur de champ est fonction de la distance focale. Elle est d'autant plus élevée que la focale est courte pour une prise de vue rapprochée.

Il nous faut donc une focale courte ou normale : ≤ 50 mm.

Mais un objectif de courte focale (grand angulaire) présente les inconvénients suivants :

- il donne une perspective exagérée : les différents plans du sujet semblent plus éloignés que dans la réalité ; les premiers plans sont grossis par rapport à ceux de l'arrière ce qui est gênant pour l'évaluation des surfaces ;
- il déforme les objets sur les bords ;

- il accentue le fait que les lignes parallèles ne sont plus parallèles sur l'image si l'on a incliné l'appareil vers le haut ou le bas.

Les objectifs apochromatiques et les objectifs photomacrographiques donnent des agrandissements trop importants (> 0.2 pour les premiers, 0.5 ou 1 pour les seconds) et ne permettent donc pas d'embrasser toute la verticale du profil (agrandissement 0.06).

Nous avons donc préféré utiliser un objectif de focale 50 mm avec un angle de champ embrassé de 47° .

III. Choix de l'obturateur

L'appareil que nous avons choisi possède un obturateur à rideaux si bien que toutes les parties du film ne sont pas impressionnées au même moment, contrairement à ce qui se passe lorsqu'on utilise un obturateur central à secteur. Ce dernier serait peut-être préférable mais nous n'avons pas le choix.

B. REGLAGE DE L'APPAREIL

La réflexion qui suit repose sur l'utilisation d'un objectif de 50 mm .

I. La distance

Si l'on utilise un objectif de focale normale, il faut se mettre à plus de 10 fois sa distance focale soit 50 cm si l'on veut éviter les problèmes de tirage qui entraînent une diminution de rendement de l'appareil photo (la notice de l'appareil utilisé indique 45 cm).

Pour un grandissement de 0.06 nécessaire à la représentation de 60 cm sur la verticale de l'image 36 mm , la distance de mise au point est de 883 mm pour une focale de 50 mm ($p = (1 + 0.06) * F / 0.06$). Nous avons choisi de pouvoir représenter 60 cm sur la verticale pour pouvoir tenir compte du foisonnement au labour et éviter les déformations trop importantes de bordure.

II. L'ouverture du diaphragme

L'objet étant immobile le choix de l'ouverture prime sur la vitesse.

Nous avons choisi une faible ouverture car :

- cela limite la surface utile de la lentille et atténue donc l'aberration sphérique au cas où celle-ci ne serait pas bien corrigée ;
- la profondeur de champ est supérieure pour de faibles ouvertures ce qui est important dans le cas d'une prise de vue rapprochée.

Comme le profil n'est pas parfaitement plan (on admet une dérive de 5 à 10 cm), le dernier plan net doit se situer à $5-10\text{ cm}$ du plan de mise au point si le réglage de la distance se fait sur la partie avant.

Avec un objectif de 50 mm et une mise au point à 883 mm , cette distance est de 10.9 cm pour un indice d'ouverture de 11 .

Il faut toutefois pouvoir rester dans un domaine de vitesses tel que les risques d'images floues soient très limités, c'est à dire éviter les vitesses inférieures à $1/15\text{s}$.

Des essais au champ ont permis de montrer que dans les conditions de luminosité en présence un réglage à ouverture $F/11$ était adéquate avec un film de 100 ISO sachant qu'il est préférable de sous-exposer légèrement que de surexposer.

Une surexposition augmente en effet la granulation et présente des risques d'irridation (perte de netteté liée à l'impression à tort de cristaux voisins sous l'action de rayons lumineux intenses) et de halo (réflexion sur les faces postérieures du support).

III. La vitesse

La vitesse est déterminée par le choix de l'ouverture et l'exposition souhaitée. Pour un indice d'ouverture de 11, nous pouvons être amenés à utiliser des vitesses assez faibles dans les conditions de luminosité rencontrées au champ aux périodes d'expérimentation aussi un support fixe pour l'appareil photo est indispensable.

C. CHOIX DE L'ECLAIRAGE ET DU POINT DE VUE

Nous avons choisi d'utiliser l'éclairage naturel car :

- la température couleur de l'éclairage artificiel est souvent inférieure à celle de la lumière naturelle ; le spectre est donc plus rouge en lumière artificielle qu'en lumière naturelle ;
- une source de lumière unique et compacte risque de produire des contrastes excessifs avec des manques de détails dans les parties éclairées.

En éclairage naturel, la lumière d'ambiance est diffusée par un ciel légèrement nuageux ou brumeux ce qui éclaire les ombres et adoucit les reliefs nécessaires à la détermination des contours.

Il faut trouver un compromis entre l'obtention d'un certain relief et le risque d'avoir des ombres trop importantes. Un éclairage de face semble peu adéquat car il écrase le relief. Une lumière naturelle dominante éclairant le sujet par dessus et de face semble la plus souhaitable.

Dans les conditions expérimentales nous avons cherché à éliminer les phénomènes d'ombres pour des parasoleils lorsque l'éclairage naturel était trop important.

La mesure de l'exposition peut se faire, soit d'après la brillance du sujet, soit l'éclairement reçu par le film.

Dans le cas de l'appareil réflectif monoobjectif que nous avons choisi, le posemètre est incorporé et la mesure se fait selon l'éclairage reçu par le film.

Le cadrage de la photo se fait de telle manière que le centre de la photo se trouve à peu près au milieu de la distance surface-profondeur de champ. En effet, un point de vue trop bas resserre les plans et souligne les objets au premier plan, un point de vue trop haut produit l'effet inverse. Nous voulons éviter ces distorsions.

D. CHOIX DU FILM

Nous avons cherché à éviter de trop violents contrastes qui entraînent une perte de détail dans les zones d'ombre et de haute lumière. L'intervalle correct d'exposition, appelé *latitude d'exposition*, dépend du film considéré.

Nous avons choisi un film noir et blanc car :

- la latitude d'exposition est supérieure à celle d'un film couleur et suffisante pour les scènes éclairées en lumière naturelle ;
- le couleur n'apporterait pas forcément un progrès à la description car, pour un sol, celle-ci dépend de la texture et de l'humidité ce qui pourrait introduire une confusion d'effet entre les différences liées à l'état structural des objets et celles liées à la texture et l'humidité.

La sensibilité de l'émulsion ne doit pas être trop rapide (> 200 ISO) car cela donne des photos à contraste faible et forte granulation, d'où une perte de précision. La séparation des éléments constitutifs du sol risque alors d'être plus difficile.

Une sensibilité de 3-25 ISO est trop faible en éclairage naturel.

Nous avons alors choisi une émulsion de 100 ISO car :

- elle assure un contraste équivalent à celui du sujet ($x 1$ à $x 1.2$) et une granulation peu visible ;
- compte-tenu de l'éclairage naturel aux périodes où nous faisons les observations (printemps-automne-hiver), un minimum de 100 ISO est requis.

L'augmentation du temps de pose conduit à une diminution de la sensibilité du film utilisé aussi nous éviterons les temps de pose trop courts.

L'appareil est muni d'un filtre de protection qui absorbe les rayons ultra-violet. Nous n'avons pas utilisé d'autre filtre bien que la sensibilité spectrale des émulsions classiques (panchromatiques) concerne l'ensemble des radiations visibles avec une plus forte sensibilité dans les couleurs violet-bleu car cela diminue le rendement photographique.

E. CHOIX DU PAPIER SENSIBLE ET AGRANDISSEMENT

Le tirage du négatif a toujours été fait sur papier brillant plutôt que papier mat, le premier présentant l'avantage de procurer de forts contrastes et de posséder une gamme étendue de demi-teintes ce qui permet d'avoir une image plus fidèle du sujet. En cas d'agrandissement le papier brillant présente l'inconvénient d'avoir des reflets. Un papier demi-brillant aurait produit des images de meilleure qualité car il n'abaisse pas autant le contraste que le papier mat et ne produit pas de reflets. Les tirages sur papier demi-brillant ne sont pas standards aussi le coût du développement aurait été trop important par rapport au gain de qualité escompté. Nous avons donc renoncé au tirage sur ce type de papier.

L'agrandissement est normal ($x 16$ en surface = $x 4$ en linéaire) car un agrandissement supérieur augmenterait la granulation.

F. ACCESSOIRES NECESSAIRES

Nous avons mentionné, au cours de l'analyse précédente, l'intérêt de certains accessoires.

Il nous est apparu nécessaire d'en utiliser certains pour les raisons suivantes :

- le parasoleil est un complément indispensable de l'objectif car il élimine les rayons qui frappent l'objectif obliquement en dehors de l'angle de champ utile, lesquels provoquent un grisaillement diminuant le contraste des clichés ; des parasoleils sur la face du profil permettent aussi de diminuer les ombres sur celle-ci ;
- le support pour l'appareil photo est indispensable pour éviter les images floues et standardiser le positionnement de l'appareil ;
- le traitement anti-reflet réduit les pertes de lumière dues à l'absorption des verres et permet d'augmenter le rendement de l'appareil photographique ce qui est loin d'être inutile lorsque la luminosité est moyenne; l'appareil choisi possède cette caractéristique.

CONCLUSION

L'analyse photographique que nous avons faite nous permet de choisir la procédure photographique suivante :

- utilisation d'un objectif de focale 50 mm adapté à un appareil reflex OLYMPUS OM1 ;
- réglage fixe de la profondeur de champ en utilisant un indice d'ouverture 11 et une distance de 1.40 m entre l'appareil et la face du profil ;
- réglage de la vitesse en fonction de la luminosité en éclairage naturel en cherchant plutôt à sous-exposer que surexposer la photo ;
- limitation par des parasoleils des éclairages trop directs produisant des ombres sur la face du profil, lorsque c'est nécessaire ;
- prises de vues rapprochées dont nous n'exploitons ensuite que le centre pour limiter les déformations de bord de photo ;
- utilisation d'un support permettant d'assurer au mieux la stabilité de l'appareil, le parallélisme du plan de la pellicule avec celui du profil et le centrage de la photo au milieu de la distance surface-profondeur de labour ;
- utilisation d'un film noir et blanc 100 ISO ;
- tirage standard sur papier brillant avec agrandissement normal.

Cette procédure a permis de produire des photos de qualité suffisante pour détecter les objets que nous cherchions à isoler sur les photos.

ANNEXE II.A2 : Morphologie mathématique

A. PROBLEME

Notre objectif est de distinguer sur l'image acquise par la caméra les mottes, vides et bandes de labour dessinés sur le document issu de l'analyse stéréoscopique des photos pour ensuite coder leur contour et évaluer, pour chaque objet ainsi détecté, les paramètres qui nous intéressent. Les mottes, les vides et les bandes de labour dessinés peuvent être accolés et donc avoir des contours communs sur le document. Il faut pouvoir les dissocier.

Après binarisation, l'image acquise est composée de pixels noirs correspondant au trait de contour des objets et de pixels blanc correspondant à leur fond.

Pour coder un contour, il faut que celui-ci soit de 1 pixel d'épaisseur.

Pour détecter les objets qui nous intéressent, il faut donc repérer les traits de contour sur l'image binarisée et les ramener à l'épaisseur de 1 pixel tout en dissociant les objets accolés. Un trait séparateur de deux objets doit donc avoir au minimum trois pixels après binarisation puisque la séparation des objets n'est effective que si chacun a un trait de contour noir de 1 pixel et si ces traits sont séparés par un pixel de fond blanc. Pour limiter les risques d'avoir des traits inférieurs à 3 pixels après binarisation, nous avons cherché à avoir en moyenne des traits de 4 pixels.

Il nous faut alors définir des procédures de transformation pour obtenir des traits d'un pixel séparés par un pixel blanc.

Nous avons utilisé pour cela une technique relevant de la morphologie mathématique.

B. MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE

I. Principes de base

La morphologie mathématique définit des méthodes destinées à l'analyse et à la description des formes. Elle prend en compte des notions ensemblistes avec les opérations classiques d'union, d'intersection, de complémentation, de différence symétrique.

L'idée de base de la morphologie mathématique est de comparer les "*objets*" que l'on veut analyser à un autre "*objet*" de forme connue appelé élément structurant et d'effectuer en cas de reconnaissance une transformation géométrique sur l'objet initial. L'élément structurant est un masque de forme quelconque dont les éléments forment un motif. Ce motif correspond dans notre cas à un certain agencement de pixels noirs et blancs.

Les opérateurs sont non linéaires irréversibles, ce qui a pour conséquence une perte de l'information initiale.

Il nous faut alors définir :

- l'élément structurant; celui-ci doit nous permettre de détecter les séquences de pixels noirs au milieu d'un fond blanc ;
- la transformation à effectuer.

II. Transformations

Les transformations de base en morphologie mathématique sont :

- l'érosion ;
- la dilatation.

L'érosion repose sur la notion d'inclusion. Si les positions x , pour lesquelles on détermine l'inclusion de l'élément structurant dans l'ensemble X , correspondent à une réponse positive pour cette question d'inclusion, alors x appartient à l'ensemble Y que l'on crée. Si ce n'est pas le cas, alors x appartient au complémentaire.

De manière pratique, dans le cas du logiciel utilisé, l'érosion se traduit par l'algorithme suivant :

"Si l'un au moins des voisins du pixel central est élément du fond, le pixel central devient élément du fond".

La dilatation se définit de manière analogue par la notion d'intersection. L'ensemble des points tels qu'il y a intersection entre l'élément structurant et l'ensemble X forme un nouvel ensemble Y dont la frontière est le lieu des centres géométrique de l'élément structurant lorsque celui-ci touche X .

De manière pratique la dilatation se traduit pour nous par l'algorithme suivant :

"Si l'un au moins des voisins du pixel central est élément de l'objet, le pixel central devient pixel objet".

Ces transformations sont duales par rapport à la complémentation. En effet, si l'on érode l'ensemble complémentaire de X , celui-ci s'accroît des parties érodées par l'élément structurant ce qui revient à effectuer une dilatation de X par cet élément structurant.

Nous voyons bien, comme l'indique d'ailleurs leur nom, que l'érosion conduit à la réduction de la taille des objets alors que la dilatation conduit à une augmentation de celle-ci.

Nous ne présenterons pas les propriétés de ces opérations mais nous soulignerons le fait que l'ordre dans lequel on les effectue conditionne le résultat final.

On distingue ainsi :

- l'ouverture qui consiste en une érosion suivie d'une dilatation ; elle a pour but d'adoucir les contours (élimination de bruits, des points isolés non significatifs) donc de jouer le rôle d'un filtre, et de déconnecter deux régions adjacentes ;

- la fermeture qui consiste en une dilatation suivie d'une érosion ; elle a pour but de boucher les trous inclus dans une surface, les canaux étroits, et de connecter des régions voisines.

Une opération d'ouverture appliquée aux objets mottes, vides et bandes de labour semblerait adaptée à notre problème puisqu'il s'agit de déconnecter des régions adjacentes. Le problème est qu'une telle technique ne dissocie que des objets peu connectés (elle est souvent utilisée pour déconnecter des objets que la binarisation a artificiellement accolés) et que son application itérative risque d'entraîner une trop forte déformation des objets. Dans notre cas des essais ont montré que l'utilisation d'une telle technique était inefficace pour dissocier les objets.

Nous avons donc préféré adopter une transformation visant à réduire la taille du trait de contour (donc à réduire quelque peu l'objet initial) pour être sûr de dissocier en une seule opération les objets qui nous intéressent. Nous verrons en annexe II.A3 les conséquences que cela a pour le calcul des paramètres des objets.

La transformation utilisée est un amincissement appliqué au trait de contour.

L'algorithme est le suivant :

"Si l'élément structurant est rencontré, le pixel central devient pixel de fond".

L'élément structurant que nous avons utilisé est le suivant :

202

020

202

Dès que l'on rencontre un tel motif (depuis le centre de l'élément structurant), c'est à dire que le pixel a tous ses voisins verticaux et horizontaux égaux à 0, le pixel central devient pixel de fond, c'est à dire blanc sachant que le fond est de couleur blanche (codé 1) et le trait de contour est de couleur noir (codé 0).

La rencontre de l'élément structurant n'a lieu que pour les pixels noirs du trait de contour qui ne sont pas en contact avec les pixels blancs de l'intérieur de l'objet. Les seuls pixels noirs restant après traitement sont ceux en contact avec l'intérieur de l'objet. Nous avons donc atteint le résultat escompté.

Pour que la transformation ait le même effet sur tous les objets, nous avons connecté artificiellement sur le dessin ceux qui étaient isolés.

Tous les objets sont dissociés après transformation et l'erreur que celle-ci introduit est de même ordre pour tous les objets.

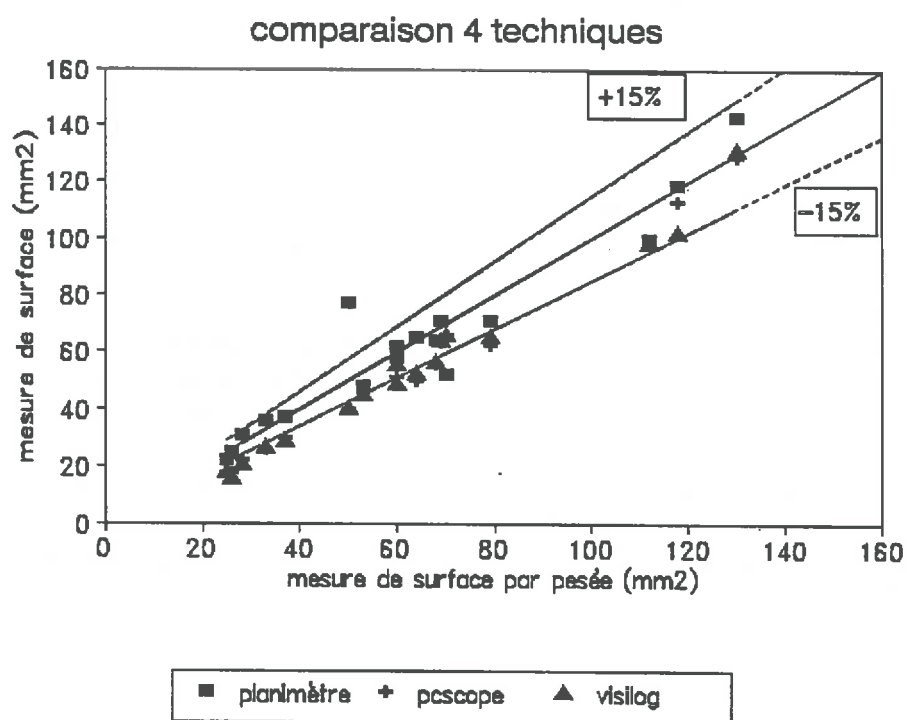


Figure A.II.A31 : Comparaison de quatre techniques d'évaluation de la surface (site de Palaiseau (91))

ANNEXE II.A3 : Evaluation des erreurs faites sur les mesures de surface au cours de la chaîne de traitement
--

A. CONFRONTATION DE TROIS TECHNIQUES D'EVALUATION DES SURFACES D'OBJET PAR RAPPORT A UNE TECHNIQUE DE REFERENCE

La technique de référence choisie est le découpage des objets dessinés sur un papier de densité connue et la pesée des objets découpés.

Les trois techniques comparées sont :

- deux techniques d'analyse d'image liées à des logiciels différents :
 - * VISILOG ;
 - * PC-SCOPE ;
- la planimétrie.

L'analyse a été faite sur les mêmes documents établis à partir de photos obtenues sur le site de Palaiseau.

La figure A.II.A31 montre :

- qu'il existe une erreur systématique par rapport à la pesée lorsqu'on utilise les techniques d'analyse d'image ;
- que les deux techniques d'analyse d'image donnent des résultats peu différents ;
- que le planimètre introduit une variabilité importante dans les mesures.

Pour déceler le biais systématique introduit et le corriger, il nous a paru bon de décomposer les sources d'erreurs possibles selon les différentes étapes de la chaîne de traitement.

B. DECOMPOSITION DES ERREURS INTRODUITES PAR LA CHAÎNE DE TRAITEMENT

L'analyse des profils se décompose en deux étapes :

- l'une au champ qui se décompose elle-même en deux phases :
 - * la préparation de la face d'observation ;
 - * la prise photographique ;
- l'autre au laboratoire qui se décompose elle-même en deux phases :
 - * la préparation d'un document exploitable ;
 - * la détection des contours et mesures.

Nous pouvons distinguer les facteurs d'erreurs intervenant à toutes les phases mentionnées, des facteurs spécifiques d'une phase.

A chaque phase on retrouve des sources d'erreurs dépendantes de la taille des objets :

- erreur liée à la résolution graphique ;
- erreur de tracé des contours lors de la préparation du document qui doit être supérieure lorsque l'objet est petit ;
- erreur liée à la détection des contours.

Les autres sources d'erreur sont plus localisées. Elles sont liées au relief donné au profil, aux paramètres de prise de vue, à la complexité des formes aux différentes étapes.

Nous présentons au tableau ci-dessous la décomposition de ces erreurs. Les sources d'erreurs sont en italique.

TERRAIN 1ère étape		LABORATOIRE 2ème étape	
1ère phase	2ème phase	1ère phase	2ème phase
PREPARATION DE LA FACE D'OBSERVATION	PRISE DE VUES	PREPARATION D'UN DOCUMENT EXPLOITABLE	DETECTION DES CONTOURS ET MESURES
<i>Détermination morphologique</i> <i>Limites des compartiments</i> <i>Respect d'un plan</i>	<i>Angle entre le plan de la pellicule et celui du profil</i> <i>Ecartement entre photos successives</i> <i>Relief des objets/plan de référence</i>	<i>Erreur de transcription des contours</i>	<i>Précision des mesures liées au logiciel:</i> <i>* choix des contours</i> <i>* forme de l'objet</i>

Les erreurs intervenant lors de la préparation de la face d'observation sont difficilement quantifiables. Elles sont d'autant plus faibles que l'observateur a un savoir d'expert.

Les autres erreurs semblent plus systématiques aussi nous avons cherché à les quantifier.

Nous avons utilisé pour cela deux procédures :

- nous avons fait subir à des objets de taille et forme bien connues, des legos, la deuxième phase de la première étape et la deuxième étape puis nous avons comparé leur surface après traitement avec la surface initiale ; l'erreur résultante intègre les erreurs des trois phases ;

- nous avons cherché à quantifier les erreurs liées à la dernière phase en comparant la surface de formes simples dessinées à la surface de ces objets après analyse d'image.

C. QUANTIFICATION DES ERREURS ACCUMULEES AU COURS DES TROIS DERNIERES PHASES

Nous avons mesuré des legos au pied à coulisse.

Nous avons fait varier les facteurs suivants :

- l'angle de prise de vue ;
- l'écartement entre photos ;
- le relief des objets.

L'effet du relief n'a pu être étudié correctement car l'effectif correspondant à un relief donné était trop réduit.

L'effet constaté semblait néanmoins aller dans le sens d'une augmentation de la surface avec le relief en raison d'une vue légèrement en perspective.

Pour les deux autres variables, nous avons quantifié l'erreur relative moyenne sur la surface des objets et son intervalle de confiance au seuil 10%.

Les résultats obtenus sur des objets de forme cubique sont présentés au tableau suivant.

ERREUR RELATIVE (%) (intervalle de confiance)		ANGLE	
		0°	4°
ECARTEMENT ENTRE PHOTOS	6.5 cm	-3.0 (+ou-4)	+6.2 (+ou-5)
	26.5 cm	-0.1 (+ou-3)	-

Les résultats obtenus montrent que :

- lorsque l'angle de prise de vue augmente, les surfaces calculées ont tendance à être plus importantes ; lorsqu'il existe un angle entre le plan de l'appareil et les objets, ceux-ci sont vus en perspective et l'on surestime leur surface ;
- l'écartement entre photos entraîne peu de différences sur les surfaces mais nous avons constaté qualitativement que l'espacement des vues entraînait des décalages de localisation d'où l'intérêt de conserver des vues rapprochées.

Il faut donc faire attention au placement de l'appareil photographique.

D. QUANTIFICATION DES ERREURS AU COURS DU TRAITEMENT INFORMATIQUE : ORIGINE DE L'ERREUR SYSTEMATIQUE LIEE AU TRAITEMENT D'IMAGE ET CORRECTION

I. Origine du biais systématique

La sous-estimation systématique des surfaces avec les techniques de traitement informatique de l'image laisse penser que ce biais est lié au mode de calcul des logiciels.

Nous avons montré dans l'annexe précédente que nous avons adopté une méthode de détection des contours Internes des objets pour pouvoir dissocier ceux-ci les uns des autres.

Le logiciel sous-estime donc systématiquement la surface de l'objet si l'on admet que la moitié du trait initial du contour appartient à celui-ci.

Dans le cas d'une forme simple, le carré, nous avons calculé l'erreur théorique introduite par la procédure de traitement.

Nous présentons le calcul ci-dessous.

Les pixels sont rectangles. Soit x la taille du pixel selon l'horizontale, y sa taille selon la verticale. D'après le constructeur $y/x = 0.7$. Un carré va donc être représenté par N_1 pixels en x , N_2 pixels en y avec $N_1 = 0.7 \cdot N_2$. La précision de l'analyseur étant au pixel près, la longueur réelle en x du carré correspondant varie entre $N_1 \cdot x$ et $(N_1 - 2) \cdot x$. Il en est de même en y .

La surface réelle du carré varie donc entre :

$(N_1 - 2) \cdot x \cdot (N_2 - 2) \cdot y$ et $N_1 \cdot x \cdot N_2 \cdot y$;

c'est-à-dire entre :

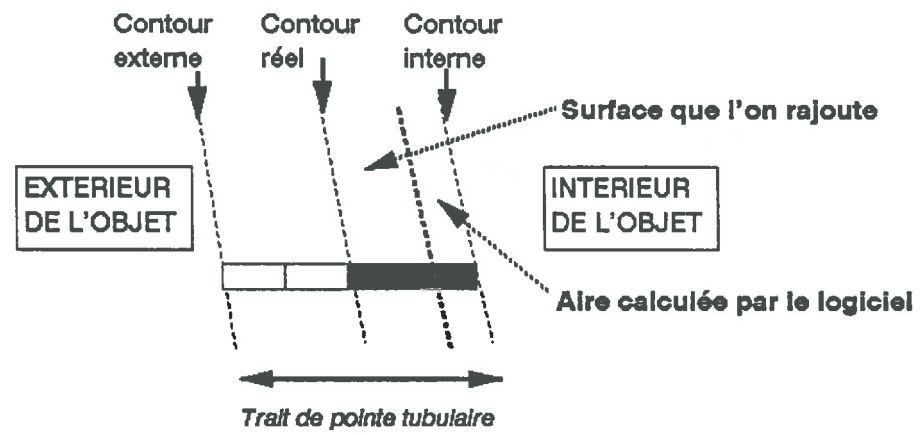


Figure A.II.A32 : Principe de la correction de surface

$$(0.7*N_2-2)*(N_2-2)*x*y=(0.7*N_2^2-1.4*N_2-2*N_2+4)*y^2/0.7 \text{ et } 0.7*N_2^2*x*y=N_2^2*y^2 ;$$

La surface calculée est :

$$(N_1-3)*(N_2-3)*x*y=(0.7*N_2^2-2.1*N_2-3*N_2+9)*y^2/0.7 ;$$

Sachant que le logiciel ne compte que la moitié de la surface des pixels des contours finaux (c'est comme si l'on enlevait à chaque bord 1.5 pixels) et que l'on admet que le trait de contour entre deux carrés est de 4 pixels (dont seulement 2 appartiennent au carré), l'erreur maximale est donc :

$$\begin{aligned} & [(0.7*N_2^2-2.1*N_2-3*N_2+9)*y^2/0.7]-N_2^2*y^2= \\ & [N_2^2*y^2-(5.1/0.7)*N_2*y^2+(9/0.7)*y^2]-N_2^2*y^2= \\ & -(5.1/0.7)*N_2*y^2+(9/0.7)*y^2; \end{aligned}$$

L'erreur relative sur la surface qui en résulte est alors :

$$E=(-7*N_2+12.8)/N_2^2$$

Cette erreur est négative pour $-7*N_2+12.8 \leq 0 \Leftrightarrow N_2 \geq 1.8$.

N étant un nombre entier nous voyons qu'il y a sous-estimation de la surface pour tous les objets de plus de 1 pixel de côté, c'est à dire tous les objets étudiés.

Le biais systématique constaté peut donc s'expliquer en partie par la procédure de traitement utilisée.

Nous constatons que l'erreur relative dépend de N_2 c'est à dire de la taille de l'objet.

Pour un carré de 35 pixels de côté (longueur des petits objets de nos profils) $E = 20\%$ ce qui est important.

Nous avons donc adopté une procédure de correction pour limiter celle-ci.

II. Procédure de correction

La procédure de correction consiste à rajouter à la surface calculée la surface de 1.5 pixels multipliée par le périmètre de l'objet. La figure A.II.A32 illustre le principe de cette correction.

Nous avons recalculé, dans le cas d'un carré, l'erreur relative après correction.

La surface calculée devient :

$$\begin{aligned} & [(N_1-3)*(N_2-3)*x*y]+1.5*y*[2*(N_1-2)*x+2*(N_2-2)*y]= \\ & [(0.7*N_2^2-2.1*N_2-3*N_2+9)*y^2/0.7]+3*y[(0.7*N_2-2)*x+(N_2-2)*y]= \\ & y^2(N_2^2-9/7*N_2-27/0.7) ; \end{aligned}$$

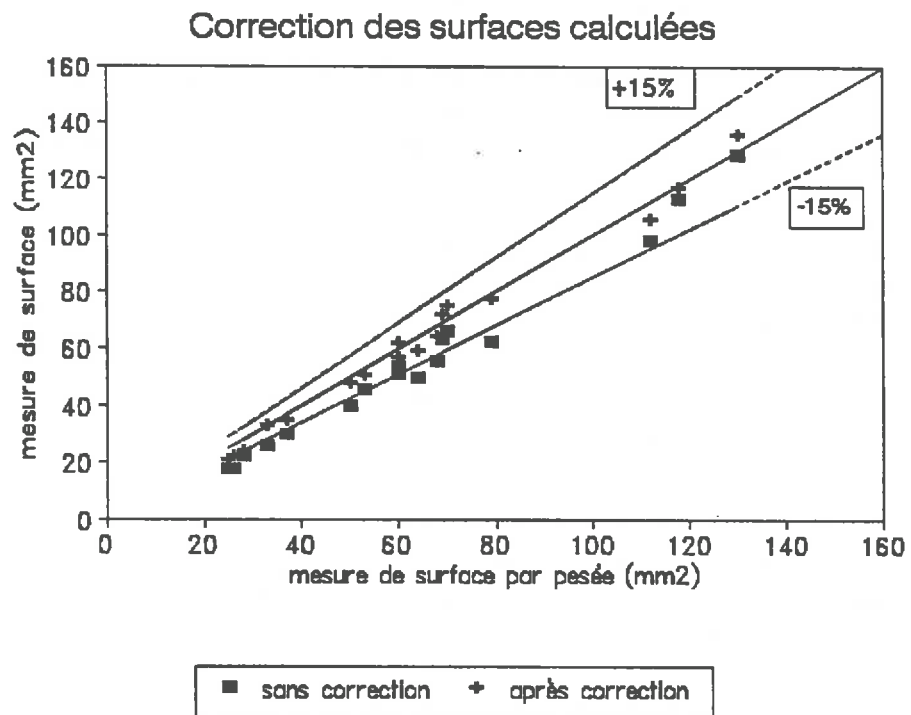
L'erreur relative est alors :

$$E=(-(9/7)*N_2-(27/0.7))/N_2^2 \approx (-1.28*N_2-3.9)/N_2^2.$$

Pour un carré de 35 pixels de côté, $E = 4\%$ ce qui devient acceptable.

Nous pouvons donc penser raisonnablement que l'erreur relative sur la mesure de surface des objets que nous avons caractérisés liée au traitement d'image ne dépasse pas 5%.

Nous avons comparé à nouveau, après correction, les surfaces des objets caractérisés sur le site de Palaiseau obtenues avec PC-SCOPE avec celles obtenues par pesée.



**Figure A.II.A33 : Correction des surfaces calculées
(site de Palaiseau (91))**

La figure A.II.A33 montre que l'erreur relative après correction est toujours inférieure à 15% et ne dépasse 5% que pour les très petits objets.

Nous présumons un effet de la forme de l'objet, c'est pourquoi nous avons cherché à étudier ce facteur dans le cas de formes simples.

III. Effet de la forme des objets sur l'erreur relative de mesure de surface

Nous avons dessiné des objets de forme simple (carrée, elliptique, ronde) mais pour lesquels nous pensons que l'erreur liée au traitement d'image varie. Nous avons alors comparé leur surface théorique à celle mesurée par l'analyseur et corrigée. Les objets étudiées sont de petite taille puisque l'erreur est supérieure dans ce cas.

FORME DES OBJETS	ERREUR RELATIVE SUR LA SURFACE DES OBJETS	NOMBRE D'OBJETS
CARREE	-7.0	10
RONDE	+1.4	10
ELLIPTIQUE	-1.7	10

Le tableau ci-dessus montre que :

- pour une forme carrée, nous sous-estimons la surface ce qui est concordant avec l'analyse théorique précédente ;
- pour une forme ronde, nous surestimons légèrement la surface ;
- pour une forme elliptique, nous sous-estimons légèrement la surface et que l'erreur est comprise entre celle du carré et celle du cercle ;
- que l'erreur est toujours inférieure à 10% et nettement inférieure à 5% dans les deux derniers cas.

L'erreur est donc quelque peu dépendante de la forme des objets.

Les objets que nous caractérisons ont des formes variables mais plutôt circulaires, aussi nous pensons que l'erreur est plus proche des deux derniers cas envisagés tout en étant probablement intermédiaire entre celle du carré et celle du rond.

Il nous paraît alors raisonnable d'admettre que nous faisons une erreur relative de $\pm 5\%$ sur les surfaces que nous calculons.

E. CONCLUSION

L'analyse que nous avons faite nous a permis de déceler des sources d'erreurs variables et de corriger une erreur systématique liée à la procédure de traitement informatique mise en place. Tous nos traitements ont alors été faits avec cette procédure de correction.

La correction est imparfaite en raison de la complexité et de la variabilité des formes des objets que nous caractérisons.

Nous avons néanmoins pu établir un ordre de grandeur de l'erreur commise en analysant des objets de forme plus simple.

Il apparaît raisonnable d'admettre une erreur relative de $\pm 5\%$ dans la mesure où l'on conserve une très grande rigueur à toutes les étapes de la chaîne de traitement.

L'erreur diminue avec la taille des objets et dépend de la forme de ceux-ci.

La taille des objets joue à toutes les étapes de la chaîne.

Les erreurs les moins contrôlables sont celles liées à la préparation du profil qui demeure un travail d'expert.

ANNEXE II.A4 : Analyse de la variabilité de l'humidité pour le calcul de la densité du sol avec la sonde gamma

Pour le calcul de la densité du sol, nous avons adopté dans les sites de Grignon et Palaiseau la démarche qui suit.

Pour chaque niveau de mesure avec la sonde gamma, nous avons calculé la densité humide du sol.

La terre prélevée dans chacun des tubes a servi, à chaque niveau, au calcul de l'humidité du sol à ce niveau. Le prélèvement effectué ne correspond pas strictement à la couche traversée par le rayon gamma aussi nous n'avons pas affecté ces valeurs d'humidité à chaque mesure de densité (la précision serait abusive). Par contre, ces valeurs nous ont servi pour analyser la variabilité de l'humidité en fonction de la profondeur et du traitement. Nous avons testé la présence d'un effet profondeur et d'un effet traitement. Lorsque l'effet est significatif, nous avons alors comparé les moyennes deux à deux par un test de Student au niveau α tel que $\alpha = 5\%$, par profondeur et par traitement.

Lorsque les mesures ne sont pas significativement différentes, nous avons fait leur moyenne et nous avons affecté la valeur aux niveaux et traitements correspondants.

L'analyse de variance a été effectuée avec le logiciel AVARE.

*** Pour le site de Grignon, nous avons défini :**

- 7 profondeurs (de 5 à 35 cm; épaisseur de chaque couche = 5 cm) ;
- 5 traitements (TT1, T1, TT2, NT résistant, NT peu résistant).

Le nombre d'individus est de 104. Il manque une donnée dans NT peu résistant à la 7ème profondeur.

La répartition est la suivante :

Traitement	Profondeur						
	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7
TT1	3	3	3	3	3	3	3
T1	3	3	3	3	3	3	3
TT2	3	3	3	3	3	3	3
NT résistant	3	3	3	3	3	3	3
NT peu résistant	3	3	3	3	3	3	2

Il apparaît :

- un effet profondeur significatif au niveau 1% ($F=6.26$) ;
- un effet traitement significatif au niveau 6% ($F=2.46$) ;
- un interaction profondeurXtraitement significative au niveau 1% ($F=3.74$).

Les tableaux suivants présentent les moyennes par profondeur et par traitement ainsi que le résumé des résultats des tests de comparaison.

HUMIDITE MOYENNE (%)	PROFONDEUR	Résultat du test
22.2193	1	1<2
22.7893	2	3<2
22.2441	3	1=3
22.6140	4	2=4
22.3146	5	3=4
21.3886	6	5<2
21.0597	7	6<5 6=7

Nous retenons que l'humidité est la même aux profondeurs 3, 4 et 5 d'une part, 6 et 7 d'autre part.

Les tests se font à n_1+n_2-2 dl pour n_1 et n_2 égaux aux effectifs des deux moyennes comparées et $\alpha'=\alpha/[n*(n-1)/2]$ avec n égal au nombre de comparaisons à réaliser pour un facteur.

HUMIDITE MOYENNE (%)	TRAITEMENT	Résultat du test
22.5412	TT1	TT2=TT1
22.371	T1	TT1>NT peu rés.
22.4883	TT2	T1=NT résistant=
22.2635	NT résistant	NT peu résistant
22.156	NT peu résistant	

Nous retenons que l'humidité est égale sur TT1 et TT2 d'une part, T1 et NT d'autre part.

*** Pour le site de Palaiseau, nous avons défini :**

- 7 profondeurs (de 5 à 35 cm; épaisseur de chaque couche= 5 cm) ;
- 4 traitements (T, NTRJ, NTRM, NTL3). La signification de ces traitements est présentée dans le texte Figure IV.D1.

Le nombre d'individus est de 97.

La répartition est la suivante :

Traitement	Profondeur						
	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7
T	4	4	4	4	4	4	4
NTRJ	4	4	4	4	3	4	4
NTRM	3	3	3	3	3	3	3
NTL3	3	3	3	3	3	3	3

Il apparaît :

- un effet profondeur significatif au niveau 1% ($F=130.15$) ;
- un effet traitement significatif au niveau 1% ($F=4.13$) ;
- une interaction profondeurXtraitement significative au niveau 5% ($F=1.88$).

Les tableaux suivants présentent les moyennes par profondeur et par traitement ainsi que le résumé des résultats des tests de comparaison.

HUMIDITE MOYENNE (%)	PROFONDEUR	Résultat du test
29.3840	1	1>2
25.4080	2	2>5
22.6597	3	5>3
22.9036	4	4=5
23.2582	5	3=6=4 mais 5>6 et 5>3
22.5442	6	3>7
22.1345	7	6>7

Nous retenons que l'humidité est la même aux profondeurs 3 et 6 (10-15 cm et 25-30 cm) mais qu'elle est différente aux autres profondeurs.

Les tests se font à n_1+n_2-2 dl pour n_1 et n_2 égaux aux effectifs des deux moyennes comparées et $\alpha'=\alpha/[n*(n-1)/2]$ avec n égal au nombre de comparaisons à réaliser pour un facteur.

HUMIDITE MOYENNE (%)	TRAITEMENT	Résultat du test
23.7451	T	T=NTRM
24.4787	NTRJ	NTRJ>NTRM
23.8117	NTRM	NTRJ>T
24.1427	NTRJ	NTRJ>NTRM

Nous retenons que l'humidité est la même sur T et NTRM mais qu'elle est différente sur les autres traitements.

**ANNEXE II.B1 : Test de sensibilité du calcul des indices des vides
avec d'autres valeurs de densité Δ et Γ**

Nous avons utilisé les 1er et 3ème quartiles des distributions des densités de mottes delta et gamma fournies par De Leon (1991).

*** Densité delta:**

1er quartile: $\rho_{\Delta}=1.63$

3ème quartile: $\rho_{\Delta}=1.71$

*** Densité gamma:**

1er quartile: $\rho_{\Gamma}=1.4$

3ème quartile: $\rho_{\Gamma}=1.5$

Nous avons tout d'abord recalculé les indices des vides pour une densité gamma constante (égale à celle utilisée dans le texte $\rho_{\Gamma}=1.47$) en faisant varier la densité delta. Dans un second temps nous avons recalculé les indices des vides pour une densité delta constante (égale à celle utilisée dans le texte $\rho_{\Delta}=1.67$) en faisant varier la densité gamma.

A. AVANT LABOUR

1) $\rho_{\Gamma}=1.47$

a) $\rho_{\Delta}=1.63$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
TT1	0.063	0.031	0.032
TT2	0.063	0.039	0.023
T1	0.121	0.052	0.069
NTb	0.264	0.134	0.130
NTa	0.586	0.450	0.137

b) $\rho_{\Delta}=1.71$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
TT1	0.063	0.037	0.026
TT2	0.063	0.046	0.017
T1	0.121	0.057	0.064
NTb	0.264	0.136	0.127
NTa	0.586	0.451	0.135

2) $\rho_{\Delta}=1.67$

$\alpha) \rho_{\Gamma}=1.4$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
TT1	0.063	0.017	0.045
TT2	0.063	0.031	0.032
T1	0.121	0.016	0.105
NTb	0.264	0.066	0.198
NTa	0.586	0.378	0.209

b) $\rho_{\Gamma}=1.5$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
TT1	0.063	0.041	0.022
TT2	0.063	0.047	0.015
T1	0.121	0.070	0.051
NTb	0.264	0.163	0.101
NTa	0.586	0.480	0.106

Les valeurs avant labour ont été obtenues à partir des mesures de masse volumique avec la sonde gamma.

B. APRES LABOUR

$\rho_{\Gamma}=1.47$ et $\rho_{\Delta}=1.67$.

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT11	0.945	0.863	0.082
NTm1	0.903	0.817	0.086
NTr1	1.002	0.914	0.087
NT12	0.602	0.514	0.088
NTm2	0.450	0.359	0.091
NTr2	0.816	0.732	0.084
TT111	0.965	0.964	0.001
TT1m1	0.684	0.666	0.018
TT1r1	0.783	0.761	0.022
TT112	0.426	0.376	0.050
TT1m2	0.582	0.545	0.038
TT1r2	0.478	0.432	0.046
TT21	0.739	0.709	0.030
TT2m	0.790	0.766	0.024
TT2r	0.690	0.648	0.042

1) $\rho_{\Gamma}=1.47$.

a) $\rho_{\Delta}=1.63$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT11	0.945	0.862	0.083
NTm1	0.903	0.816	0.087
NTr1	1.002	0.914	0.088
NT12	0.602	0.514	0.088
NTm2	0.450	0.359	0.091
NTr2	0.816	0.732	0.084
TT111	0.965	0.959	0.006
TT1m1	0.684	0.661	0.023
TT1r1	0.783	0.757	0.027
TT112	0.426	0.373	0.054
TT1m2	0.582	0.540	0.042
TT1r2	0.478	0.428	0.050
TT21	0.739	0.705	0.034
TT2m	0.790	0.762	0.028
TT2r	0.690	0.644	0.046

b) $\rho_{\Delta}=1.71$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT11	0.945	0.864	0.082
NTm1	0.903	0.817	0.086
NTr1	1.002	0.915	0.087
NT12	0.602	0.515	0.087
NTm2	0.450	0.360	0.090
NTr2	0.816	0.733	0.083
TT111	0.965	0.969	-0.004
TT1m1	0.684	0.670	0.013
TT1r1	0.783	0.766	0.018
TT112	0.426	0.380	0.046
TT1m2	0.582	0.549	0.034
TT1r2	0.478	0.436	0.042
TT21	0.739	0.713	0.027
TT2m	0.790	0.770	0.020
TT2r	0.690	0.651	0.038

2) $\rho_{\Delta}=1.67$

α) $\rho_{\Gamma}=1.4$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT11	0.945	0.795	0.150
NTm1	0.903	0.746	0.158
NTr1	1.002	0.842	0.159
NT12	0.602	0.442	0.160
NTm2	0.450	0.285	0.166
NTr2	0.816	0.663	0.153
TT111	0.965	0.963	0.002
TT1m1	0.684	0.658	0.026
TT1r1	0.783	0.751	0.032
TT112	0.426	0.355	0.072
TT1m2	0.582	0.528	0.054
TT1r2	0.478	0.412	0.066
TT21	0.739	0.694	0.045
TT2m	0.790	0.754	0.036
TT2r	0.690	0.628	0.062

b) $\rho_r=1.5$

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT11	0.945	0.890	0.055
NTm1	0.903	0.845	0.058
NTr1	1.002	0.943	0.059
NT12	0.602	0.543	0.059
NTm2	0.450	0.389	0.061
NTr2	0.816	0.760	0.056
TT111	0.965	0.964	0.001
TT1m1	0.684	0.669	0.015
TT1r1	0.783	0.765	0.018
TT112	0.426	0.385	0.041
TT1m2	0.582	0.551	0.031
TT1r2	0.478	0.440	0.038
TT21	0.739	0.715	0.025
TT2m	0.790	0.771	0.019
TT2r	0.690	0.656	0.034

Les valeurs après labour ont été obtenues en recalculant la masse volumique après labour d'après la masse volumique avant labour et le volume observé après labour. Nous faisons l'hypothèse que la masse considérée est la même avant et après labour, ce qui est admissible d'après nos résultats. Les risques d'erreur sont néanmoins supérieurs pour les indices des vides après labour (cela explique la valeur légèrement négative au tableau du § B.1) b).).

Rang de la variable	Sd	S2n	S3n	S4n	Sg	Sgtf	Nombre de jours après labour	Calibre médian des mottes Δ et Δ fissuré	Date d'observation (traitement)
1	34.50	12.00	25.00	7.00	22.50	26.00	1.00	17.50	1
2	44.00	12.00	10.50	35.50	10.00	16.50	1.00	17.50	
3	39.50	41.50	10.50	7.00	8.00	21.50	1.00	17.50	
4	42.50	27.50	31.50	27.50	6.50	8.50	1.00	17.50	
5	39.50	12.00	25.00	44.00	2.00	8.50	3.00	17.50	2
6	2.00	12.00	25.00	45.00	1.00	21.50	3.00	17.50	
7	11.50	34.50	10.50	47.00	4.00	11.00	3.00	17.50	
8	14.00	12.00	25.00	48.00	4.00	2.00	3.00	40.00	
9	34.50	45.00	10.50	7.00	14.50	21.50	6.00	17.50	3
10	23.00	34.50	39.50	27.50	4.00	14.50	6.00	17.50	
11	45.00	27.50	10.50	39.00	19.50	6.50	6.00	46.50	
12	29.00	27.50	25.00	17.50	19.50	38.50	6.00	40.00	
13	34.50	12.00	10.50	7.00	35.50	36.00	8.00	40.00	4
14	48.00	12.00	39.50	7.00	14.50	2.00	8.00	17.50	
15	2.00	12.00	43.50	27.50	22.50	32.50	8.00	46.50	
16	29.00	12.00	43.50	27.50	14.50	18.00	8.00	17.50	
17	2.00	12.00	48.00	27.50	41.00	21.50	9.00	17.50	5
18	34.50	12.00	39.50	7.00	10.00	21.50	9.00	17.50	
19	34.50	45.00	25.00	46.00	14.50	2.00	9.00	40.00	
20	23.00	12.00	10.50	27.50	44.00	36.00	9.00	17.50	
21	29.00	12.00	31.50	7.00	27.00	38.50	9.00	40.00	6
22	11.50	34.50	10.50	27.50	31.00	46.00	9.00	17.50	
23	7.50	12.00	10.50	35.50	31.00	48.00	9.00	17.50	
24	11.50	12.00	10.50	42.00	12.00	29.00	9.00	40.00	
25	17.00	27.50	34.50	43.00	35.50	4.50	10.00	40.00	7
26	23.00	12.00	10.50	17.50	37.50	41.50	10.00	17.50	
27	47.00	34.50	10.50	7.00	22.50	13.00	10.00	17.50	
28	39.50	34.50	10.50	39.00	10.00	16.50	10.00	17.50	
29	17.00	12.00	25.00	7.00	39.00	41.50	10.00	17.50	8
30	7.50	39.00	10.50	17.50	47.00	46.00	10.00	17.50	
31	23.00	48.00	46.00	7.00	18.00	11.00	10.00	40.00	
32	4.50	12.00	43.50	27.50	43.00	32.50	10.00	17.50	
33	29.00	41.50	10.50	17.50	6.50	29.00	13.00	17.50	7
34	23.00	27.50	39.50	17.50	22.50	14.50	13.00	40.00	
35	39.50	12.00	10.50	27.50	17.00	32.50	13.00	17.50	
36	34.50	45.00	47.00	7.00	27.00	4.50	13.00	17.50	
37	11.50	45.00	31.50	27.50	27.00	29.00	13.00	48.00	8
38	4.50	27.50	36.50	27.50	37.50	44.00	13.00	17.50	
39	23.00	27.50	10.50	39.00	34.00	32.50	13.00	17.50	
40	7.50	27.50	25.00	41.00	45.50	36.00	13.00	17.50	
41	17.00	45.00	31.50	17.50	25.00	26.00	14.00	17.50	8
42	42.50	39.00	10.50	17.50	31.00	21.50	14.00	17.50	
43	46.00	39.00	36.50	7.00	31.00	6.50	14.00	40.00	
44	7.50	12.00	10.50	27.50	48.00	46.00	14.00	17.50	
45	23.00	12.00	34.50	35.50	41.00	26.00	14.00	17.50	8
46	29.00	12.00	25.00	7.00	45.50	41.50	14.00	17.50	
47	17.00	34.50	43.50	17.50	41.00	11.00	14.00	40.00	
48	17.00	12.00	10.50	35.50	31.00	41.50	14.00	17.50	

ANNEXE II.C1 : Test d'un effet date d'observation

Pour tester l'existence d'un effet date d'observation nous avons appliqué aux variables de description de l'état structural le test de KRUSKAL-WALLIS.

Chaque date d'observation est considérée comme égale à un traitement.

Le test s'applique au tableau de données ci-contre correspondant au rang des variables étudiées.

Nous présentons alors ci-dessous le résultat des tests effectués sur le rang des variables :

VARIABLE : Sd

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 161
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 67
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 132
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 114
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 154
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 179
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 173
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 199

Statistique du test :

H= 9.651

ddl= 7

α = 20.83%

VARIABLE : S2n

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 93
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 71
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 135
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 48
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 152
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 220
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 254
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 206

Statistique du test :

H= 9.666

ddl= 7

α = 20.74%

VARIABLE : S3n

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 78
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 86
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 86
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 137
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 186
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 191
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 211
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 203

Statistique du test :

H= 3.125

ddl= 7

$\alpha = 87.39\%$

VARIABLE : S4n

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 77
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 184
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 91
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 69
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 220
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 166
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 205
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 165

Statistique du test :

H= 12.751

ddl= 7

$\alpha = 7.78\%$

VARIABLE : Sg

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 47
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 11
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 58
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 87
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 211
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 253
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 217
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 294

Statistique du test :

H= 23.732

ddl= 7

$\alpha = 0.14\%$

VARIABLE : Sg_{tf}

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 73
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 43
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 81
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 89
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 243
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 207
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 222
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 220

Statistique du test :

H= 7.419

ddl= 7

$\alpha = 38.66\%$

VARIABLE : ddf₅₀ (calibre médian des mottes delta et delta fissurées)

TRAITEMENT 1, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 70
TRAITEMENT 2, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 93
TRAITEMENT 3, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 122
TRAITEMENT 4, NOMBRE D'OBSERVATIONS=4, SOMME DES RANGS= 122
TRAITEMENT 5, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 208
TRAITEMENT 6, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 185
TRAITEMENT 7, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 193
TRAITEMENT 8, NOMBRE D'OBSERVATIONS=8, SOMME DES RANGS= 185

Statistique du test :

H= 2.692

ddl= 7

$\alpha = 91.20\%$

Nous constatons qu' α est toujours supérieur à 5% pour toutes les variables sauf pour la variable Sg.

Pour celle-ci, nous admettons donc qu'il y a un effet date d'observation avec un risque d'erreur de 1%. Cet effet ne se retrouve pas pour la variable Sg_{tf} qui globalement n'évolue pas car la terre fine se transforme en mottes gamma.

**ANNEXE II.C2 : Relation mesure de surface d'un objet-
mesure de longueur de l'objet**

Dans le cas des traitements tassés, c'est-à-dire ceux pour lesquels les mottes caractérisées sont les plus nombreuses, nous avons établi, pour les groupes de situations dégagés par l'analyse des calibres, la relation existant entre la surface et la longueur de chaque objet. Nous constatons que celle-ci est bonne mais que la dispersion augmente quelque peu pour les mottes de plus de 15 cm.

Il existe de rares cas (environ une motte par profil) pour lesquels la taille de la motte est importante mais la surface limitée. Il s'agit de mottes delta en fond de raie.

A titre d'exemple nous présentons ci-dessous la figure obtenue dans le traitement TT1 labouré à vitesse lente car elle nous semble illustrer l'ensemble des cas rencontrés.

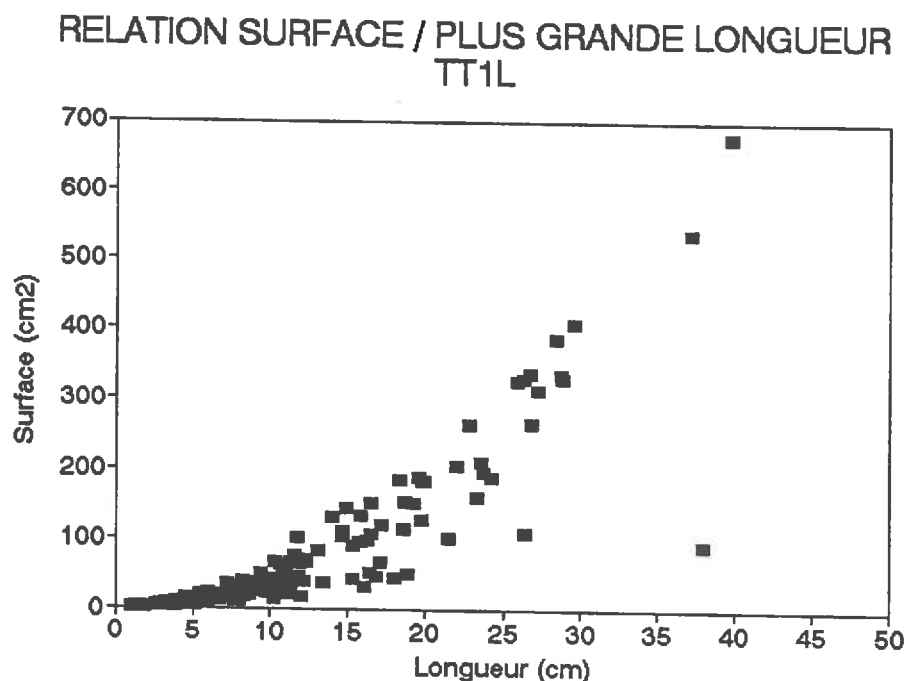


Figure A.II.C21 : Relation entre la surface et la plus grande longueur de l'objet

ANNEXE III.A1 : Test du χ^2 entre distributions surfaciques des calibres avant labour dans NT

Nous avons étudié avant labour dans le traitement NT la distribution des calibres en termes de surface.

Nous avons effectué un test du χ^2 sur le tableau suivant pour tester la différence des distributions entre les situations de NT.

VARIABLE	NT60A	NT40A	NT20A	NT20B
5/SD	20	20	5	19
10/SD	48	35	10	34
(15+20+sup20) /SD	32	45	85	46

Nous obtenons le résultat suivant :

$$\chi^2=63.95$$

$$ddl=6$$

$$\alpha=0.00\%.$$

La différence entre situations est donc significative au niveau 1%.

Si nous supprimons la situation NT20A et si nous testons la différence de distribution des trois autres situations nous avons le résultat suivant :

$$\chi^2=6.37$$

$$ddl=4$$

$$\alpha=17.16\%.$$

La différence entre NT60A, NT40A et NT20B n'est donc pas significative au niveau 5%.

ANNEXE III.B1 : Test du χ^2 entre distributions surfaciques des calibres après labour

Nous avons testé la différence des distributions surfaciques des mottes entre toutes les situations des traitements étudiés puis entre les classes issues de la classification automatique effectuée.

Les données ayant servi à faire les tests du χ^2 sont fournies dans le texte au tableau III.B3. Nous ne présentons donc ici que le résultat des tests.

Ensemble des situations (tout le tableau III.B3) :

$$\chi^2=667.55$$

$$ddl=96$$

$$\alpha=0.00\%.$$

Les différences sont donc globalement significatives au niveau 1%.

Classes :

n°1 (NTI1, NTI2, NTm1, NTm2, NTr1, NTr2) :

Pour cette classe, nous avons été obligés de regrouper les calibres de plus de 15 cm en une seule classe de calibre car les effectifs des classes regroupées sont trop faibles pour que celles-ci soient individualisées.

$$\chi^2=33.18$$

$$ddl=15$$

$$\alpha=0.45\%.$$

Les différences sont donc significatives au niveau 1%.

La classe 1 n'est donc pas homogène.

Si l'on élimine la situation NTr1 qui semble marquée par une teneur surfacique en mottes de plus de 15 cm particulièrement forte on obtient :

$$\chi^2=18.82$$

$$ddl=12$$

$$\alpha=9.25\%.$$

La différence devient non significative au niveau 5%.

Si l'on oppose alors l'ensemble des situations de NT à la situation de NTr1 on obtient le tableau suivant :

VARIABLE"effectif"	NT sans NTr1	NTr1
5/SD	95	22
10/SD	193	36
15/SD	119	33
(20+sup20)/SD	93	4

Le test donne alors :

$$\chi^2=14.59$$

$$ddl=3$$

$$\alpha=0.24\%.$$

NTr1 a donc bien une distribution des calibres qui est significativement différente des autres situations de NT au niveau $\alpha=5\%$.

n°2 (TT1l1, TT1l2, TT2r) :

$$\chi^2=12.98$$

$$ddl=12$$

$$\alpha=37.04\%.$$

La différence est non significative au niveau 5%.

n°3 (TT1m1, TT1r2, T1r) :

$$\chi^2=20.32$$

$$ddl=12$$

$$\alpha=6.10\%.$$

La différence est non significative au niveau 5%.

n°4 (TT1m2, TT1r1) :

$$\chi^2=11.24$$

$$ddl=6$$

$$\alpha=8.05\%.$$

La différence est non significative au niveau 5%.

n°5 (T1m, TT2l, TT2m) :

$$\chi^2=29.75$$

$$ddl=12$$

$$\alpha=0.31\%.$$

Les différences sont donc significatives au niveau 1%.

La classe n°5 n'est pas homogène.

Nous avons donc comparé les membres deux à deux :

- TT2l, TT2m ;

$$\chi^2=15.64 ;$$

$$ddl=6 ;$$

$$\alpha=1.59 ;$$

- T1m, TT2l ;

$$\chi^2=22.19 ;$$

$$ddl=6 ;$$

$$\alpha=0.12\% ;$$

- T1m, TT2m ;

$$\chi^2=12.52 ;$$

$$ddl=6 ;$$

$$\alpha=5.10\% ;$$

Les différences observées sont donc significatives au niveau 5% (6% dans le dernier cas).

La différence entre les classes n°3 et n°4 est faible.

En effet certains membres de chacune des classes ont des distributions qui ne sont pas significativement différentes au niveau 1% (TT1r1, TT1r2) :

$$\chi^2=13.84$$

$$ddl=6$$

$$\alpha=3.13\%.$$

ANNEXE III.B2 : Réanalyse de la distribution des calibres après labour dans les traitements tassés avec des classes de 1 cm d'étendue

Pour chaque profil, nous avons recalculé les surfaces occupées par classes de 1 cm et déterminé le calibre médian, le premier quartile et le troisième quartile des distributions ainsi obtenues.

Le tableau ci-dessous présente les résultats.

TRAITEMENT	CALIBRE DES MOTTES DELTA ET DELTA FISSUREES (cm)		
	MEDIAN	PREMIER QUARTILE	TROISIEME QUARTILE
T1m (2-4)	15	8	18
T1r (2-4)	22	10	31
TT1l	19	10	27
TT1m1	19	12	28
TT1m2	23	11	28
TT1r	21	11	28
TT2l	15	11	21
TT2m	17	8	24
TT2r	18	10	26

Nous constatons que :

- la zone de T1 labourée à vitesse moyenne et celle de TT2 labourée à vitesse lente ont de plus petits calibres médians, 1er et 3ème quartile ;
- celles de TT2 labourées à vitesse moyenne et rapide sont intermédiaires entre les précédentes et celles de TT1 ;
- les zones de TT1 ont des distributions d'allures voisines ; celles labourées à vitesse moyenne dans la répétition 2 et celles labourées à vitesse rapide ont des calibres médians plus importants ;
- la zone de T1 labourée à vitesse rapide a un calibre médian de même ordre que les zones de TT1 précédemment distinguées mais la distribution est plus étalée ; cette zone de T1 correspond au plus faible 1er quartile et au plus fort 3ème quartile.

Les résultats conduisent aux mêmes constatations qu'avec des classes de 5 cm.

ANNEXE III.C1 : Test du χ^2 entre distributions en nombre obtenues avant et après labour, et pour des vitesses différentes

A. Test du χ^2 entre distributions en nombre obtenues avant et après labour.

I. Traitement NT

Les distributions avant et après labour sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	APRES LABOUR	AVANT LABOUR
5	532	92
10	286	48
15	67	17
10	22	6
sup20	8	2

Nous avons regroupé les mottes de plus de 20 cm car les mottes de plus de 30 cm sont rares.

$$\chi^2=2.94$$

$$ddl=4$$

$$\alpha=57.12\%.$$

Les distributions ne sont pas significativement différentes au niveau 5%.

II. Traitement TT1

Les distributions avant et après labour sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	APRES LABOUR	AVANT LABOUR
5	753	44
10	207	12
15	86	1
10	41	0
25	30	4
30	18	1
sup30	14	6

$$\chi^2=30.74$$

$$ddl=6$$

$$\alpha=0.00\%.$$

Les distributions sont significativement différentes au niveau 1%.

III. Traitement TT2

Les distributions avant et après labour sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	APRES LABOUR	AVANT LABOUR
5	307	51
10	138	6
15	49	0
10	19	0
25	14	0
sup25	12	5

Nous avons dû regrouper les classes 30 et sup30 car les effectifs étaient trop faibles.

$$\chi^2=27.99$$

$$ddl=5$$

$$\alpha=0.01\%.$$

Les distributions sont significativement différentes au niveau 1%.

B. Test du χ^2 entre distributions en nombre après labour à des vitesses différentes.

I. Traitement NT

Les distributions après labour selon les vitesses sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	LENTE	MOYENNE	RAPIDE
5	166	165	201
10	101	89	96
15	30	17	20
sup15	11	8	11

Nous avons dû regrouper les classes 20 et sup20 car les effectifs étaient trop faibles.

$$\chi^2=6.18$$

$$ddl=6$$

$$\alpha=40.37\%.$$

Les distributions ne sont pas significativement différentes au niveau 5%.

II. Traitement TT1

Les distributions après labour selon les vitesses sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	LENTE	MOYENNE	RAPIDE
5	239	245	269
10	72	60	75
15	28	30	28
20	17	10	14
25	6	11	13
30	9	3	6
sup30	3	7	4

$$\chi^2=10.71$$

$$ddl=12$$

$$\alpha=55.42\%.$$

Les distributions ne sont pas significativement différentes au niveau 5%.

III. Traitement TT2

Les distributions après labour selon les vitesses sont les suivantes :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	LENTE	MOYENNE	RAPIDE
5	69	128	110
10	48	60	30
15	23	13	13
20	10	5	4
sup20	6	11	9

Nous avons dû regrouper les classes 25, 30 et sup30 car les effectifs étaient trop faibles.

$$\chi^2=26.49$$

$$ddl=8$$

$$\alpha=0.09\%.$$

Les distributions sont significativement différentes au niveau 1%.

Les faibles calibres sont moins représentés dans la situation correspondant à la vitesse lente.

Nous avons donc testé l'absence de différence entre les deux autres situations (moyenne et rapide) :

$$\chi^2=4.97$$

$$ddl=4$$

$$\alpha=28.98\%.$$

Les distributions ne sont pas significativement différentes au niveau 5%.

Si l'on oppose les situations labourées à vitesse moyenne et rapide à la situation labourée à vitesse lente, le tableau devient :

NOMBRE DE MOTTES/CLASSE	LENTE	MOYENNE+RAPIDE
5	69	238
10	48	90
15	23	26
20	10	9
sup20	6	20

$$\chi^2=21.87$$

$$ddl=4$$

$$\alpha=0.03\%.$$

Les distributions sont significativement différentes au niveau 1%.

La situation labourée à vitesse lente dans TT2 a donc des mottes de calibre significativement plus important que les situations labourées à vitesse moyenne et rapide.

ANNEXE IV.A1 : Calculs mécaniques intermédiaires simples

Comme la somme vectorielle de v_e et v_τ est égale à v_b , on a par projection horizontale et verticale :

$$-v_\tau + v_e \cos(\theta) = -v_b \cos(\epsilon)$$

$$v_e \sin(\theta) = v_b \sin(\epsilon)$$

On en déduit :

$$v_b = v_\tau \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)$$

Sous l'hypothèse d'une accélération constante, comme la vitesse initiale de la bande est nulle, $dv_b/dt = v_b/t$.

$$\text{Donc } F_a = (m \cdot v_\tau \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)) / t.$$

Nous montrons par ailleurs que :

m correspond à la masse de terre accélérée pendant le temps t d'inertie I .

Le tracteur avance d'une distance $v_\tau \cdot t$ pendant t aussi la masse de sol accélérée est :

$$m = \gamma \cdot b \cdot d_\tau \cdot v_\tau \cdot t.$$

Comme $F_a = (m \cdot v_\tau \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)) / t$, l'inertie correspondante est donc :

$$F_a = \gamma \cdot b \cdot d_\tau \cdot v_\tau^2 \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon).$$

ANNEXE IV.A2 : Calcul et analyse des propriétés des fonctions H_i intervenant dans l'analyse de l'effort.

A.CALCUL DES FONCTIONS H_i .

Nous devons à exprimer G à partir des deux équations suivantes:

(1) Projection verticale :

$$-G + R_n \cos(\theta) - \mu R_n \sin(\theta) + N_1 \cos(\beta) - N_1 \tan(\phi) \sin(\beta) - C A_1 \sin(\beta) - F_a \sin(\epsilon) = 0$$

(2) Projection horizontale :

$$-R_n \sin(\theta) - \mu R_n \cos(\theta) + N_1 \sin(\beta) + N_1 \tan(\phi) \cos(\beta) + C A_1 \cos(\beta) + F_a \cos(\epsilon) = 0$$

(1) nous donne :

$$G = R_n \cos(\theta) - \mu R_n \sin(\theta) + N_1 \cos(\beta) - N_1 \tan(\phi) \sin(\beta) - C A_1 \sin(\beta) - F_a \sin(\epsilon) = (\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) R_n + (\cos(\beta) - \tan(\phi) \sin(\beta)) N_1 - C A_1 \sin(\beta) - F_a \sin(\epsilon);$$

(2) nous donne :

$$R_n = [(N_1 \sin(\beta) + N_1 \tan(\phi) \cos(\beta) + C A_1 \cos(\beta) + F_a \cos(\epsilon)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))];$$

donc :

$$\begin{aligned} G &= [(\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))] [N_1 (\sin(\beta) + \tan(\phi) \cos(\beta)) + C A_1 \cos(\beta) + F_a \cos(\epsilon)] + N_1 (\cos(\beta) - \tan(\phi) \sin(\beta)) - C A_1 \sin(\beta) - F_a \sin(\epsilon); \\ G &= N_1 [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) (\sin(\beta) + \tan(\phi) \cos(\beta)) + (\cos(\beta) - \tan(\phi) \sin(\beta))] + C A_1 [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) \cos(\beta) - \sin(\beta)] + F_a [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) \cos(\epsilon) - \sin(\epsilon)]. \end{aligned}$$

Comme $G = mg = \gamma b d_\tau l g$, nous avons compte-tenu de l'expression de F_a présentée en annexe IV.A1.

$$l = N_1 H_1(\theta, \mu, \phi) / (\gamma b d_\tau) + C H_2(\theta, \mu, \phi) / (\gamma \sin(\beta)) + v_\tau^2 H_3(\theta, \mu, \epsilon)$$

$$H_1 = (1/g) [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) (\sin(\beta) + \tan(\phi) \cos(\beta)) + (\cos(\beta) - \tan(\phi) \sin(\beta))].$$

$$H_2 = (1/g) [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) \cos(\beta) - \sin(\beta)] (\sin(\beta) / \sin(\alpha + \beta)).$$

$$H_3 = (1/g) (\sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)) [((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) \cos(\epsilon) - \sin(\epsilon)].$$

B. PROPRIETES DES FONCTIONS H_i

I. Conditions pour que les fonctions H_i soient décroissantes en fonction de μ

Calculs des fonctions dérivées de H_i en fonction de μ :

$$H_1'(\mu) = -(1/g) * (\sin(\beta) + \tan(\phi) * \cos(\beta)) / (\sin(\theta) + \mu * \cos(\theta))^2 ;$$

$$H_2'(\mu) = -(1/g) * \cos(\beta) / (\sin(\theta) + \mu * \cos(\theta))^2 * (\sin(\beta) / \sin(\alpha + \beta)) ;$$

$$H_3'(\mu) = -[(1/g) * \cos(\epsilon) * (\sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon))] / [(\sin(\theta) + \mu * \cos(\theta))^2].$$

Si $0 \leq \beta \leq \pi/2$ et $0 \leq \alpha \leq \pi/2$, alors $\cos(\beta) \geq 0$ et $\sin(\beta) / \sin(\alpha + \beta) \geq 0$ donc $H_2'(\mu)$ est négative.

Nous avons : $\phi = \pi/2 - 2\beta$, donc :

$$\begin{aligned} \sin(\beta) + \tan(\phi) * \cos(\beta) &= \sin(\beta) + \tan(\pi/2 - 2\beta) * \cos(\beta) \\ &= \sin(\beta) + \cotan(2\beta) * \cos(\beta) = (1 + \sin(\beta)^2) / (2\sin(\beta)). \end{aligned}$$

Si $0 \leq \beta \leq \pi/2$, alors $\sin(\beta) \geq 0$, donc $H_1'(\mu)$ est négative.

Si $0 \leq \theta \leq \pi/2$ et $0 \leq \epsilon \leq \pi/2$ alors $\cos(\epsilon) \geq 0$ et $\sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon) \geq 0$ donc $H_3'(\mu)$ est négative.

II. Conditions supplémentaires pour que les fonctions H_i soient positives

Nous supposons d'emblée que $0 \leq \beta \leq \pi/2$, $0 \leq \theta \leq \pi/2$ et $0 \leq \epsilon \leq \pi/2$.

Soit $z = ((\cos(\theta) - \mu * \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu * \cos(\theta)))$

(a) :
$H_1 \geq 0 \Leftrightarrow z \geq (\tan(\phi) * \sin(\beta) - \cos(\beta)) / (\sin(\beta) + \tan(\phi) * \cos(\beta))$ car $\sin(\beta) + \tan(\phi) * \cos(\beta) \geq 0$;
(b) :
$H_2 \geq 0 \Leftrightarrow z \geq \tan(\beta)$ car $\cos(\beta) \geq 0$;
(c) :
$H_3 \geq 0 \Leftrightarrow z \geq \tan(\epsilon)$ car $\cos(\epsilon) \geq 0$ et $(\sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)) \geq 0$.

(b) est vraie si $z \geq \tan(\beta)$.

Si (b) est vraie alors (c) est vraie car compte-tenu de l'incurvation du versoir $\beta \geq \epsilon$ donc $\tan(\beta) \geq \tan(\epsilon)$ pour β et ϵ appartenant à l'intervalle $[0, \pi/2]$.

(a) est vraie si :

$$z \geq [\tan(\pi/2 - 2\beta) * \sin(\beta) - \cos(\beta)] / [\sin(\beta) + \tan(\pi/2 - 2\beta) * \cos(\beta)] = -\tan(\beta) / (2\sin(\beta)^2 + 1).$$

Pour $0 \leq \beta \leq \pi/2$, $\tan(\beta) \geq 0$. Comme $-\tan(\beta) / (2\sin(\beta)^2 + 1) \leq 0$ alors $\tan(\beta) \geq -\tan(\beta) / (2\sin(\beta)^2 + 1)$.

Donc si (b) est vraie alors (a) est vraie.

Pour que les trois fonctions H_i soient positives il suffit donc que $z \geq \tan(\beta)$ c'est-à-dire que :

$$((\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))) \geq \tan(\beta)$$

Pour que H_1 soit positive il suffit que $z \geq 0 \Leftrightarrow \cos(\theta) - \mu \sin(\theta) \geq 0 \Leftrightarrow 1/\mu \geq \tan(\theta)$.

Si $0 \leq \theta \leq \pi/4$ alors $\tan(\theta) \leq 1$.

Or, $0 \leq \tan^{-1}(\mu) \leq \pi/4$ donc $\mu \leq 1$ et $1/\mu \geq 1$.

donc si $0 \leq \theta \leq \pi/4$ alors $1/\mu \geq \tan(\theta)$.

Pour que H_1 soit positive il suffit que $0 \leq \theta \leq \pi/4$.



Figure A.IV.D11 : Ensemble tracteur-charrue utilisé sur la parcelle de Grignon (78)

ANNEXE IV.D1 : Caractéristiques complémentaires et photographies des systèmes tracteur-outil et des appareils de mesures utilisés

A. CARACTERISTIQUES DES ROUES DES TRACTEURS UTILISES SUR LA PARCELLE DE GRIGNON POUR LE PRECEDENT CULTURAL DE L'ESSAI REALISE

OPERATION CULTURALE	CARACTERISTIQUES	
	Largeur (cm)	Voie (cm)
LABOUR	40	165
PASSAGE DE HERSE ROTATIVE	40	165
SEMIS	30	128

B. CARACTERISTIQUES COMPLEMENTAIRES DU SYSTEME TRACTEUR-OUTIL UTILISE POUR LE LABOUR

I. Sur la parcelle de Grignon

Tracteur Massey Ferguson 595 type Perkins A-4-318 utilisé en 4 roues motrices.
Charrue bisocs HUARD (Fig.A.IV.D11).

*** Caractéristiques des pneumatiques :**

Pneumatiques avant : 11x28.

Pneumatiques arrière : 14x38.

*** Caractéristiques du corps de charrue :**

1) Le soc

Largeur de coupe : 35 cm.

Largeur : 13 cm.

Angle d'entrure : 23°.

Angle d'attaque : 47°.

2) Le versoir

Longueur : 99 cm.

Angle d'entrure générale : 26°.

Angle moyen du versoir : 31°.

Angle du bord supérieur du versoir : 37°.



Figure A.IV.D12 : Ensemble tracteur-charrue utilisé sur la parcelle de Palaiseau (91)

II. Sur la parcelle de Palaiseau

Tracteur RENAULT Type 145–14 TX utilisé en 4 roues motrices.
Charrue trisocs HUARD, modèle BRE65T (Fig.A.IV.D.12).

*** Caractéristiques des pneumatiques :**

Pneumatiques avant : 16.9x28.

Pneumatiques arrière : 18.4x38.

*** Caractéristiques du corps de charrue :**

1) Le soc

Largeur de coupe : 35 cm.

Largeur : 13 cm.

Angle d'entrure : 22°.

Angle d'attaque : 39°.

2) Le versoir

Longueur : 98 cm avec prolonge de 21 cm.

Angle d'entrure générale : 27°.

Angle moyen du versoir : 36°.

Angle du bord supérieur du versoir : 39.5°.

C. DESCRIPTION PHOTOGRAPHIQUE DES APPAREILS DE MESURES UTILISES POUR CARACTERISER LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TRACTEUR–OUTIL

I. Les capteurs

Les figures (photos) A.IV.D13 à D17 présentent les différents appareils de mesures utilisés :

- mesure de l'effort de traction grâce à des capteurs dynamométriques sur la barre d'attelage (Fig.A.IV.D13 ; Fig.A.IV.D14) ;
- mesure de la vitesse d'avancement du tracteur grâce à :
 - * une cellule photo-électrique émettant un faisceau se réfléchissant au niveau de barrières fixées sur le terrain (A.IV.D15) ;
 - * un système avec une dynamo entraînée par un tambour (Fig.A.IV.D16) ;
 - * un radar à effet Doppler (Fig.A.IV.D17).

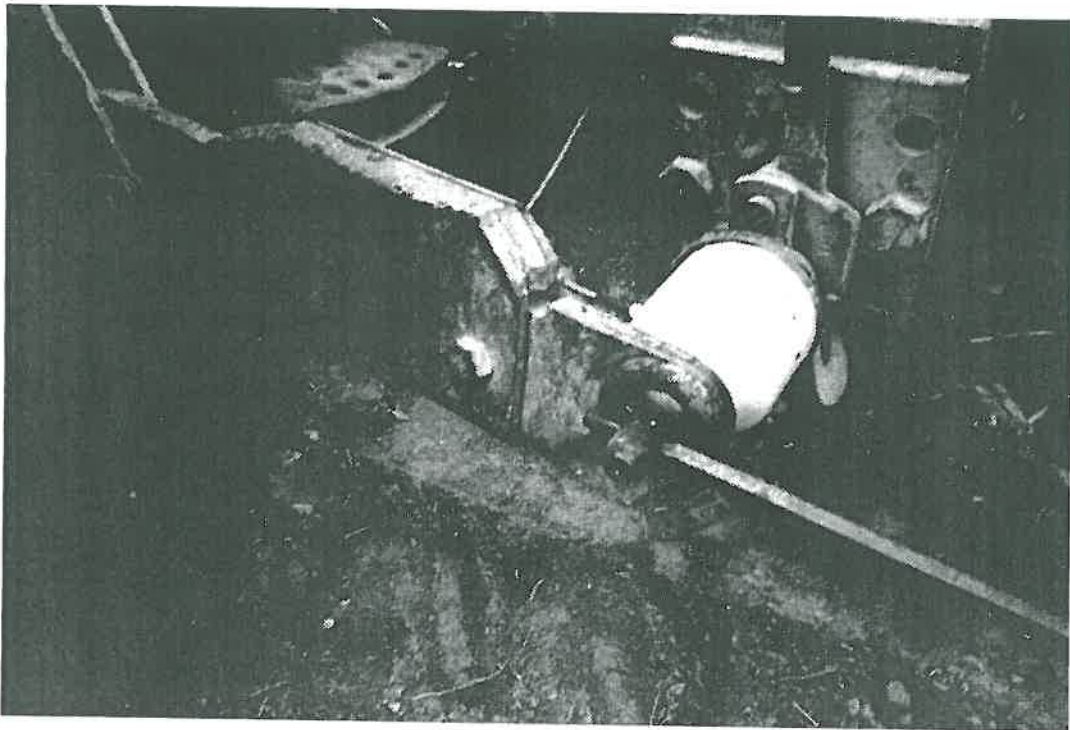


Figure A.IV.D13 : Capteur dynamométrique sur le barreau d'attelage du tracteur utilisé sur la parcelle de Grignon (78)



Figure A.IV.D14 : Capteur dynamométrique sur le barreau d'attelage du tracteur utilisé sur la parcelle de Palaiseau (91)

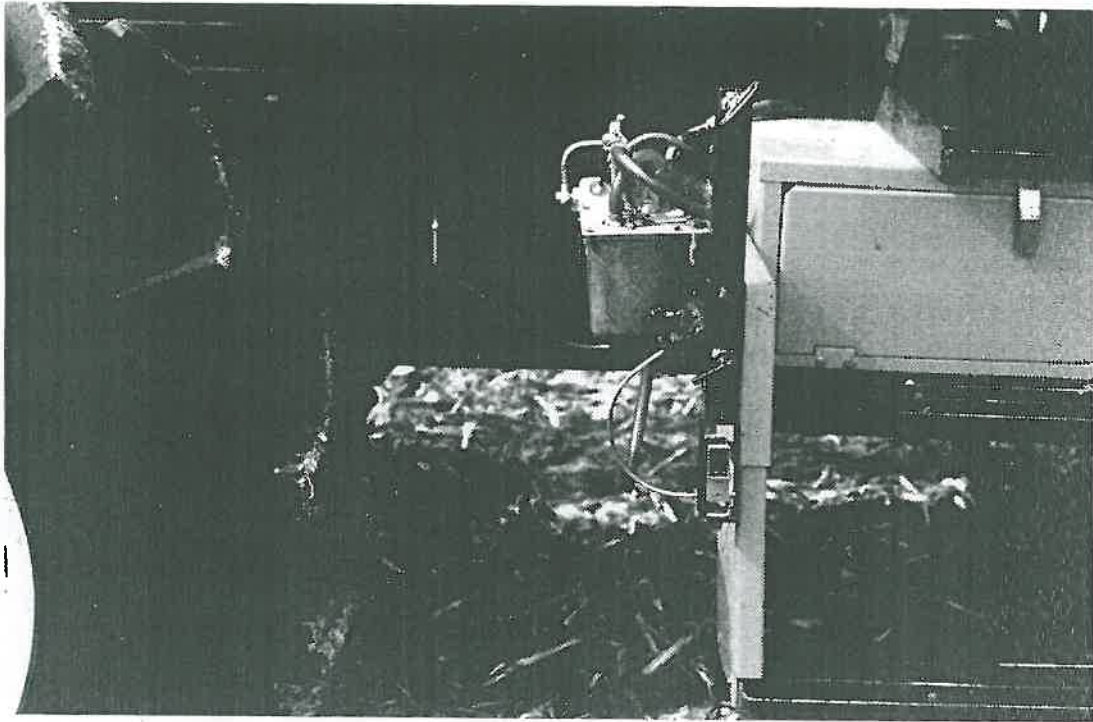


Figure A.IV.D15 : Cellule photoélectrique fixée sur le tracteur utilisé sur la parcelle de Palaiseau (91)

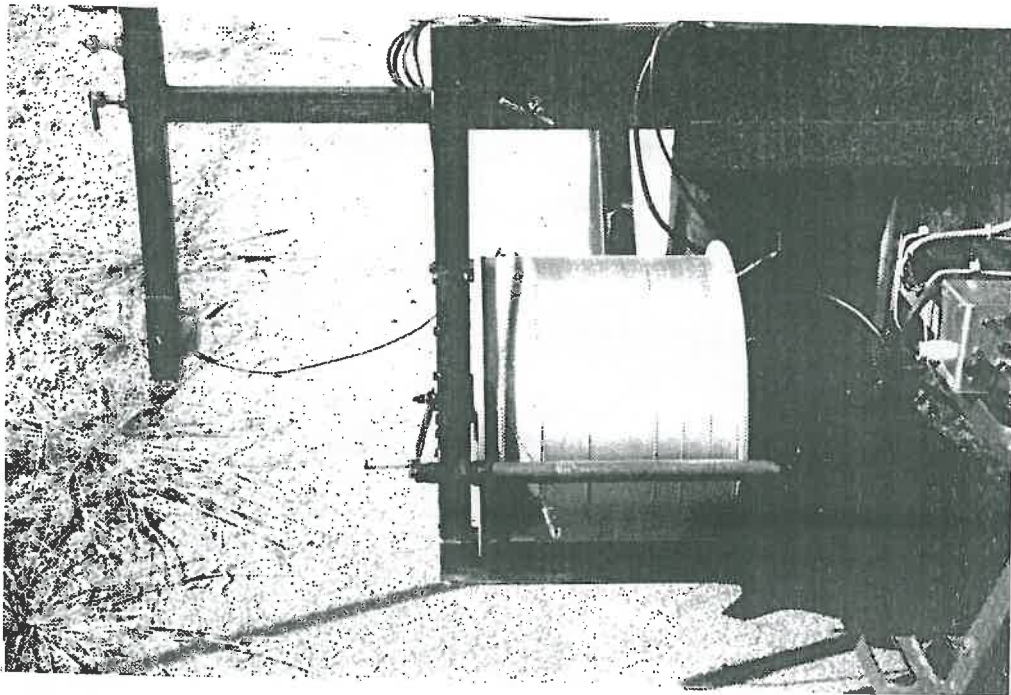


Figure A.IV.D16 : Tambour utilisé sur la parcelle de Palaiseau (91)(d'après Hong, 1990)



Figure A.IV.D17 : Radar fixé à l'avant du tracteur utilisé sur la parcelle de Grignon (78)

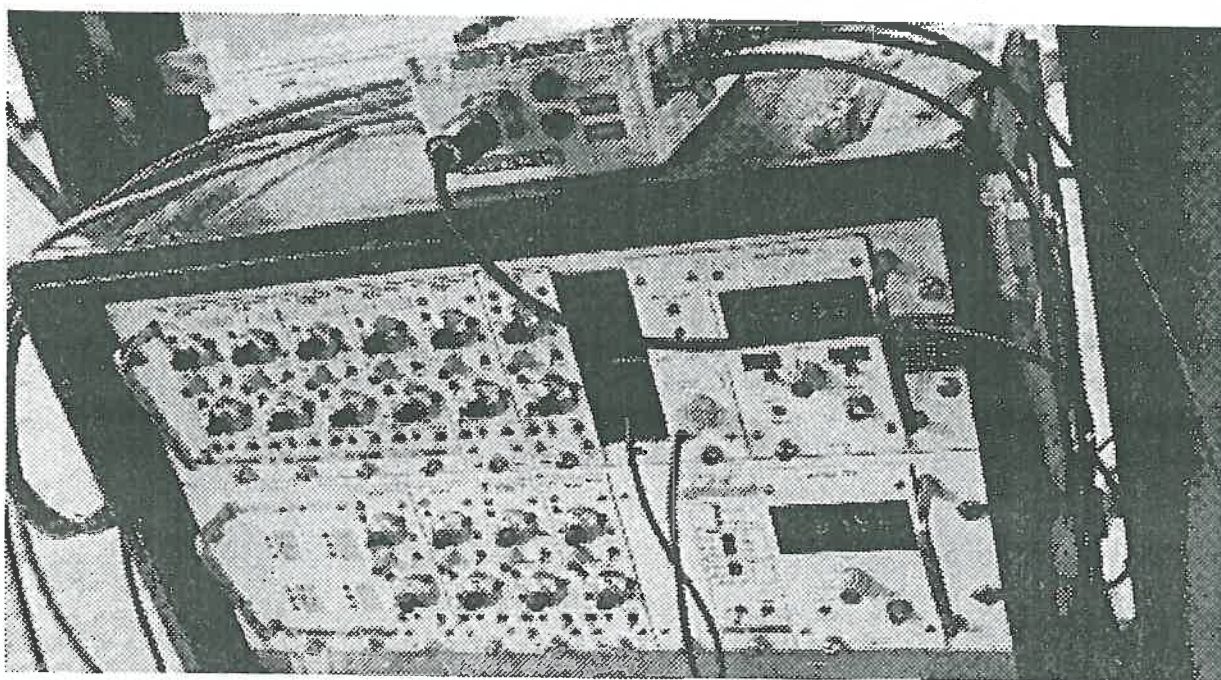


Figure A.IV.D18 : Conditionneur et émetteur de la chaîne de télémessure (d'après Verma, 1989)

II. Le système de saisie et d'enregistrement des données sur la parcelle de Palaiseau

Les figures (photos) A.IV.D18 à D20 présentent les différents éléments de la chaîne de télémesure :

- un dispositif embarqué sur le tracteur (Fig.A.IV.D18) ;
- un dispositif situé dans un véhicule à proximité de la parcelle d'essai (Fig.A.IV.D19 ; Fig.A.IV.D20).

Le schéma de câblage est présenté figure A.IV.D21.

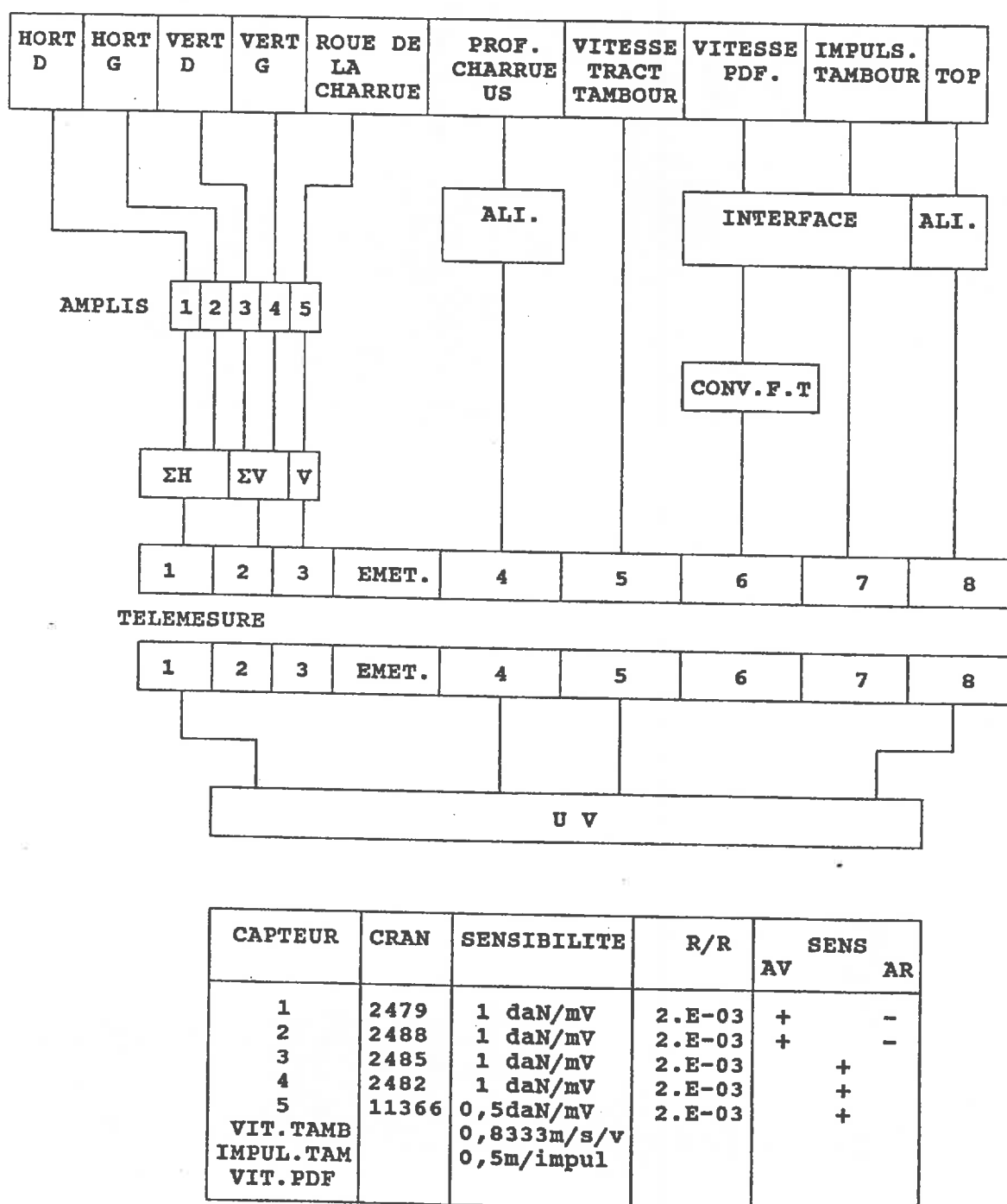


Figure A.IV.D21 : Schéma Télémesure pour essais tracteur-charrue (Palaiseau, 1989)

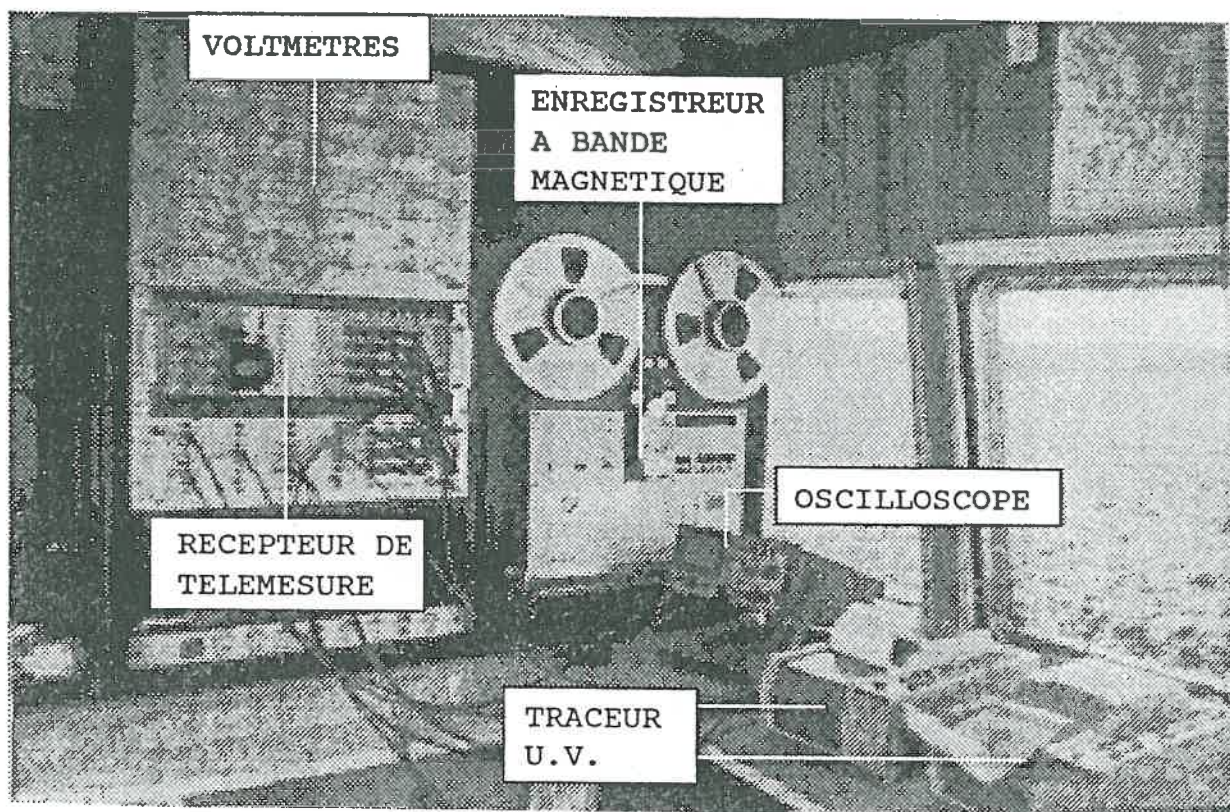


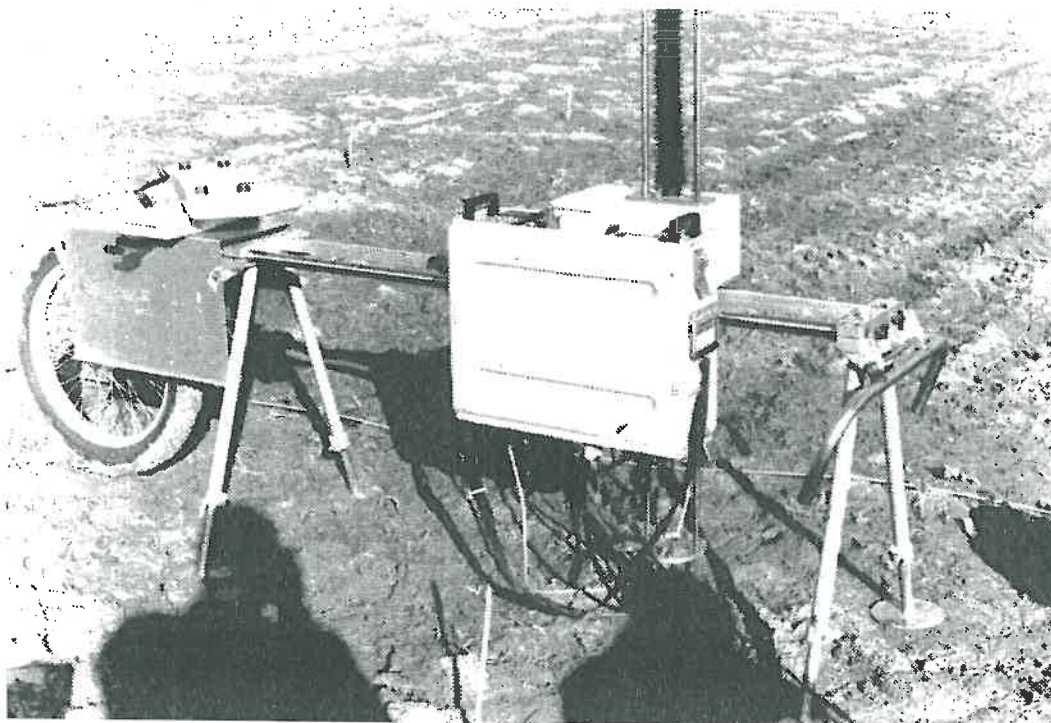
Figure A.IV.D19 : Récepteur, enregistreur et appareils de contrôle de la chaîne de télémesure (d'après Verma, 1989)



Figure A.IV.D20 : Camion de réception-enregistrement associé à la télémesure, et tracteur en cours de travail (d'après Verma, 1989)

D. DESCRIPTION PHOTOGRAPHIQUE DU PENETROMETRE ENREGISTREUR UTILISE SUR LA PARCELLE DE PALAISEAU

Les figures A.IV.D22 et A.IV.D23 (photos) présentent le pénétrömètre enregistreur utilisé pour mesurer la résistance du sol. Les descentes sont espacées de 2 cm les unes des autres et pour chaque descente les mesures sont faites avec un pas de 10 mesures/cm. La pointe utilisée était de 0.4 cm².



*Figure A.IV.D22 : Vue d'ensemble du pénétrömètre électronique CEMAGREF
utilisé sur la parcelle de Palaiseau (91)*

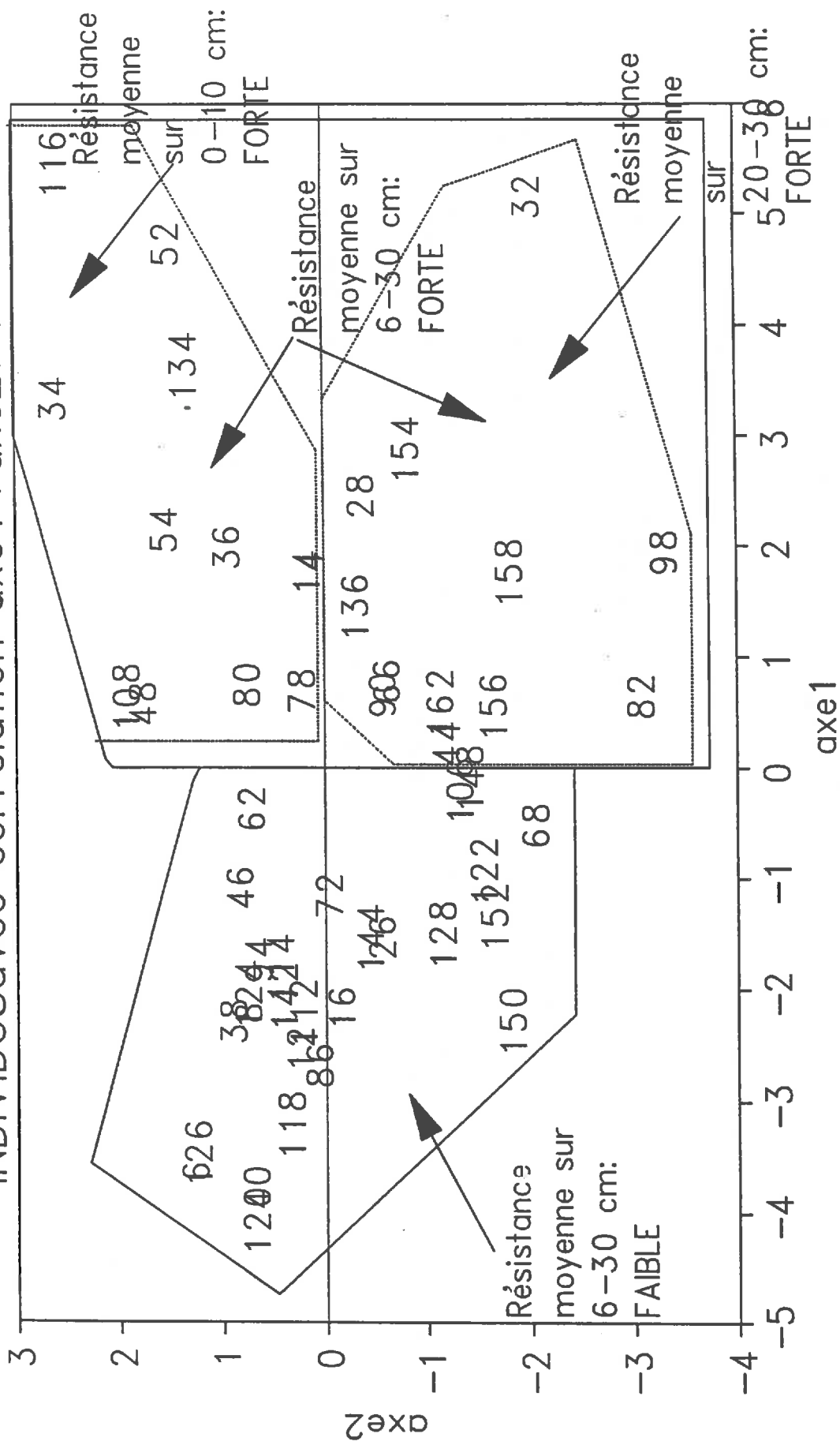


Figure A.IV.D23 : Pointe pénétrométrique du pénétrömètre électronique CEMAGREF

ANNEXES "ANALYSES STATISTIQUES DESCRIPTIVES"

1) Analyse de la résistance pénétrométrique sur la parcelle de Grignon

ACP sur mesures pénétrométriques: TR1
INDIVIDUS avec corrélation $\text{axe1} + \text{axe2} > 0.5$



Indicateur: Localisation sur le transect (en décimètres)

**2) Données pour l'analyse en composantes principales
des résistances pénétrométriques du transect TR1**

Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Indicateur (Localisation latérale, en dm)
1	13.30	27.90	54.20	54.20	54.80	60.00	2
2	31.40	39.00	49.50	59.40	68.80	64.70	4
3	8.00	12.70	16.20	16.20	16.20	16.20	6
4	16.20	19.10	20.90	24.40	26.70	39.60	8
5	42.50	39.60	37.20	33.70	41.90	63.50	10
6	13.30	13.30	16.20	16.80	39.60	36.10	12
7	28.50	44.80	48.30	55.30	62.90	69.40	14
8	12.70	29.60	39.60	42.50	42.50	70.50	16
9	17.90	22.60	25.00	41.30	43.70	72.30	18
10	12.70	32.00	51.80	58.80	42.50	47.20	20
11	13.30	13.30	13.30	29.00	42.50	42.50	22
12	13.90	22.60	48.90	73.40	55.30	46.00	24
13	8.00	17.40	27.30	36.60	37.80	58.30	26
14	22.00	37.20	55.90	95.10	68.80	62.30	28
15	19.10	22.00	48.90	57.10	57.10	57.10	30
16	25.00	58.30	62.30	96.80	124.30	89.80	32
17	57.10	60.00	60.00	62.90	65.90	45.40	34
18	29.60	47.70	60.00	60.00	58.30	57.10	36
19	10.90	22.00	23.80	26.70	27.90	30.20	38
20	7.40	7.40	9.80	16.20	18.50	25.00	40
21	8.60	46.60	42.50	42.50	34.90	32.60	42
22	10.30	25.50	34.30	57.70	66.40	62.90	44
23	19.10	25.00	30.20	42.50	34.30	40.10	46
24	30.20	36.10	50.70	57.10	41.90	34.30	48
25	12.10	29.00	39.60	91.60	61.80	41.30	50
26	44.80	79.30	78.70	62.90	72.90	78.70	52
27	28.50	43.10	79.90	63.50	57.10	42.50	54
28	11.50	13.30	51.20	63.50	48.30	47.20	56
29	12.70	33.10	57.70	60.60	50.70	64.70	58
30	8.00	36.60	48.30	62.30	60.00	43.10	60
31	16.80	33.70	39.60	43.10	42.50	44.20	62
32	8.60	28.50	33.70	60.00	46.00	20.90	64
33	16.80	34.90	44.80	45.40	66.40	67.60	66
34	4.50	11.50	41.90	45.40	45.40	92.70	68
35	16.80	29.60	43.70	62.30	44.80	33.70	70
36	13.90	20.90	25.00	41.90	48.30	43.10	72
37	6.30	32.00	41.30	57.10	47.70	42.50	74
38	17.90	31.40	34.90	61.80	67.00	48.30	76
39	20.90	32.60	44.80	62.30	53.00	53.60	78

Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Indicateur (Localisation latérale en dm)
40	18.50	35.50	52.40	62.90	57.10	36.60	80
41	10.30	13.30	22.00	72.30	80.50	91.60	82
42	13.90	27.30	48.90	53.60	43.70	74.60	84
43	6.80	13.30	17.40	24.40	33.70	36.60	86
44	13.90	19.70	47.20	58.80	44.20	42.50	88
45	13.90	33.70	44.20	53.00	62.90	62.90	90
46	10.90	27.90	53.60	58.80	40.70	34.30	92
47	17.40	19.10	22.60	33.70	36.60	35.50	94
48	10.30	24.40	48.30	50.10	47.20	44.20	96
49	9.20	19.10	47.70	66.40	104.40	94.50	98
50	13.30	16.20	45.40	45.40	47.20	48.30	100
51	6.80	25.50	54.20	68.80	59.40	51.20	102
52	17.90	36.60	41.90	45.40	45.40	65.30	104
53	13.30	16.20	24.40	61.80	65.30	60.00	106
54	20.90	39.00	65.30	57.10	44.80	23.20	108
55	7.40	27.30	62.30	78.10	55.30	41.30	110
56	6.30	10.90	32.00	33.70	33.70	33.70	112
57	7.40	26.10	27.90	30.80	32.60	39.60	114
58	60.00	75.20	86.90	80.50	69.90	65.90	116
59	6.30	9.80	16.20	18.50	27.30	30.80	118
60	4.50	4.50	9.80	16.20	16.20	20.90	120
61	11.50	13.30	16.20	41.30	71.10	58.30	122
62	9.20	20.30	30.20	30.80	30.80	30.80	124
63	11.50	13.30	13.30	15.00	19.10	19.10	126
64	8.00	10.30	22.00	34.90	60.00	51.80	128
65	13.90	32.00	44.80	55.90	52.40	53.00	130
66	13.90	23.80	51.80	48.30	48.30	48.30	132
67	18.50	67.00	92.10	88.60	57.10	53.00	134
68	11.50	38.40	56.50	73.40	65.30	54.80	136
69	4.50	36.60	40.10	86.90	59.40	49.50	138
70	6.30	24.40	53.00	75.80	43.10	30.80	140
71	9.80	13.30	30.20	33.70	33.70	33.70	142
72	10.30	17.90	29.60	30.80	30.80	65.90	144
73	20.90	30.80	34.90	42.50	46.00	62.90	146
74	11.50	23.20	30.80	44.20	65.90	71.10	148
75	4.50	4.50	8.60	30.20	48.30	67.60	150
76	4.50	7.40	33.70	33.70	47.70	74.60	152
77	15.60	46.00	72.90	73.40	74.00	80.50	154
78	10.30	29.00	36.60	49.50	70.50	78.70	156
79	13.30	39.60	39.60	63.50	83.40	83.40	158
80	25.00	33.10	33.70	33.70	50.70	70.50	160
81	15.00	20.90	42.50	61.20	65.30	67.60	162

3) Données pour l'analyse en composantes principales des résistances pénétrométriques du transect TR2

Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Indicateur (Localisation latérale en dm)
1	14.40	75.80	87.50	95.10	95.10	92.70	2
2	15.60	29.60	47.20	56.50	73.40	62.30	4
3	13.30	29.60	33.70	38.40	46.00	83.40	6
4	27.90	37.80	44.20	70.50	69.90	73.40	8
5	93.90	82.80	67.00	64.70	69.40	82.80	10
6	14.40	20.90	41.30	47.70	34.90	75.20	12
7	18.50	32.60	32.60	57.10	64.10	55.30	14
8	10.30	13.90	33.70	25.50	45.40	85.10	16
9	21.50	38.40	41.30	36.10	44.20	85.10	18
10	27.90	34.30	42.50	69.40	79.90	53.00	20
11	12.70	25.50	35.50	43.10	47.20	40.70	22
12	10.90	22.60	29.60	46.60	43.10	37.80	24
13	17.40	26.10	43.10	55.90	52.40	51.20	26
14	12.10	27.30	35.50	37.80	43.70	64.70	28
15	7.40	15.60	37.80	89.20	76.40	44.80	30
16	12.10	23.20	57.10	95.10	109.10	64.70	32
17	20.90	37.80	46.60	50.70	60.00	57.70	34
18	19.70	42.50	57.10	57.10	57.10	56.50	36
19	25.50	34.30	58.30	74.60	72.90	57.70	38
20	8.60	20.30	27.30	33.70	32.60	27.90	40
21	23.20	39.00	39.60	52.40	62.90	67.60	42
22	15.60	20.90	22.00	28.50	30.80	25.00	44
23	8.00	16.20	16.20	20.30	33.70	33.70	46
24	11.50	20.90	30.80	72.30	77.00	55.30	48
25	19.70	37.20	50.10	102.70	153.50	130.10	50
26	9.80	51.80	64.70	58.30	48.90	53.00	52
27	4.50	41.30	42.50	42.50	42.50	42.50	54
28	17.40	27.90	51.80	54.20	76.40	92.10	56
29	10.90	31.40	36.60	41.90	43.70	48.30	58
30	10.30	19.10	22.00	40.10	42.50	38.40	60
31	13.30	22.00	25.00	36.60	36.60	39.60	62
32	12.70	22.00	25.00	39.60	39.60	39.60	64
33	36.60	73.40	81.60	81.60	64.10	50.10	66
34	19.10	33.70	39.60	37.20	21.50	23.80	68
35	22.00	34.30	39.60	42.50	34.30	30.80	70
36	18.50	19.10	23.80	57.10	58.80	51.80	72
37	12.10	23.80	32.00	69.90	71.70	40.70	74
38	12.70	28.50	36.60	40.70	71.10	64.10	76
39	23.20	27.90	35.50	61.20	59.40	37.20	78

Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Indicateur (Localisation latérale en dm)
40	10.30	11.50	55.90	82.20	61.80	36.10	80
41	7.40	9.20	13.90	33.70	33.70	33.70	82
42	16.80	19.70	29.60	51.20	51.20	63.50	84
43	17.90	34.30	43.10	61.20	53.60	62.90	86
44	13.90	16.20	19.10	39.60	39.60	39.60	88
45	4.50	4.50	4.50	7.40	10.30	16.20	90
46	16.80	35.50	45.40	56.50	60.00	46.60	92
47	4.50	4.50	8.60	34.90	36.60	36.60	94
48	8.00	10.30	12.70	7.40	25.00	25.00	96
49	10.30	10.30	10.90	41.30	42.50	42.50	98
50	8.00	19.70	28.50	43.70	44.20	36.60	100
51	4.50	4.50	7.40	48.90	50.10	48.30	102
52	13.90	29.60	33.70	50.70	47.20	30.20	104
53	8.60	13.30	29.60	35.50	60.60	62.90	106
54	4.50	4.50	11.50	22.60	34.90	36.60	108
55	23.20	53.60	57.10	61.80	58.80	51.20	110
56	13.30	25.00	29.00	30.80	30.80	30.80	112
57	10.30	47.70	60.00	65.90	74.00	74.60	114
58	10.30	34.90	91.00	95.70	59.40	49.50	116
59	14.40	57.10	68.20	74.60	64.70	48.30	118
60	6.80	7.40	7.40	13.90	25.00	25.00	120
61	20.30	28.50	40.10	65.30	71.70	61.80	122
62	9.20	20.30	54.20	54.20	54.20	51.20	124
63	17.90	27.90	27.90	31.40	48.30	54.20	126
64	7.40	7.40	8.00	25.00	26.10	27.90	128
65	6.30	16.80	30.80	46.60	54.20	54.20	130
66	13.30	45.40	55.90	69.90	84.50	80.50	132
67	9.80	22.00	85.10	118.40	118.40	118.40	134
68	18.50	26.70	53.00	67.00	59.40	46.60	136
69	12.10	30.20	56.50	123.70	94.50	68.80	138
70	12.10	13.30	17.40	30.80	39.00	39.60	140
71	13.90	30.80	63.50	74.60	69.90	49.50	142
72	10.30	10.30	39.00	68.80	62.30	63.50	144
73	12.70	13.30	13.30	19.10	20.30	22.00	146
74	7.40	7.40	9.20	10.30	8.00	7.40	148
75	7.40	7.40	7.40	11.50	16.20	17.90	150
76	12.10	13.30	17.90	36.10	33.70	33.70	152
77	20.30	27.90	42.50	45.40	55.30	77.50	154
78	10.30	16.20	53.00	82.80	79.90	64.10	156
79	19.70	35.50	37.80	58.80	71.70	71.70	158
80	10.30	10.30	10.30	10.30	22.60	54.20	160
81	12.10	39.60	54.20	53.60	48.30	39.60	162

**4) Données pour l'analyse factorielle des correspondances
sur les surfaces occupées par les types de mottes avant labour**

Variable	Sddb	S1n	S2S3n	Sgtf	Svi	Svs	Indicateur (Traitement)
1	442.30	991.80	68.50	470.40	0.00	102.50	1
2	419.20	1265.60	42.10	614.10	0.00	77.90	1
3	1092.40	481.70	16.30	584.40	0.00	84.70	1
4	1214.50	793.50	38.70	526.10	0.00	61.20	1
5	2240.50	0.00	0.00	447.20	0.00	92.00	4
6	115.90	880.10	0.00	344.80	0.00	35.70	4
7	1520.20	15.90	0.00	422.10	0.00	34.70	4
8	2865.70	30.80	0.00	332.00	0.00	146.20	4
9	436.30	485.40	282.50	1402.00	0.00	54.50	3
10	556.00	14.60	11.60	1523.80	0.00	67.80	3
11	1895.30	40.40	35.40	519.00	0.00	37.10	3
12	1177.50	28.30	0.00	1203.60	0.00	27.70	3
13	177.30	90.80	169.00	2291.30	0.00	0.00	21
14	79.20	61.40	257.40	2291.60	0.00	116.80	21
15	57.20	272.70	124.80	2231.90	0.00	45.50	21
16	319.60	88.10	53.30	2164.80	0.00	102.20	21
17	46.30	200.60	157.30	2014.30	0.00	134.70	22
18	19.40	107.90	86.90	1745.90	0.00	63.80	22
19	68.40	83.00	191.00	2026.60	3.20	26.30	22
20	179.20	340.10	87.70	1837.20	0.00	88.80	22
21	24.40	116.20	13.30	1653.40	0.00	0.00	22
22	69.00	75.30	134.60	1991.20	0.00	59.70	23
23	0.00	76.90	331.10	1587.70	0.00	102.50	23
24	55.00	11.20	443.60	2212.80	0.00	122.20	23
25	449.20	41.80	458.50	1537.20	0.00	80.10	23
26	15.50	57.00	35.70	765.30	0.00	0.00	23
27	184.40	113.30	42.80	2006.40	0.00	94.30	24
28	301.60	182.50	207.60	1629.30	0.00	136.20	24
29	150.10	174.30	348.20	1431.10	0.00	105.00	24
30	161.10	68.10	147.70	1833.70	0.00	53.40	24
31	211.70	378.60	67.60	2342.70	0.00	49.60	24

**5) Données pour l'analyse factorielle des correspondances
sur les surfaces occupées par les calibres des mottes avant labour**

Variable	5	10	15	20	sup20	Indicateur (Traitement)
1	70.30	62.40	0.00	0.00	1370.00	1
2	81.90	99.70	0.00	0.00	1545.30	1
3	47.90	71.50	41.10	0.00	1430.00	1
4	99.70	60.60	0.00	0.00	1886.30	1
5	66.40	108.40	102.00	0.00	1963.70	4
6	40.00	25.00	51.00	0.00	880.10	4
7	85.70	14.10	0.00	0.00	1436.20	4
8	123.90	49.50	0.00	0.00	2723.10	4
9	53.20	76.20	296.70	255.20	522.90	3
10	11.60	57.90	0.00	0.00	512.80	3
11	24.70	105.40	0.00	0.00	1841.00	3
12	26.10	118.20	197.50	0.00	864.00	3
13	112.30	190.20	134.60	0.00	0.00	21
14	41.00	218.10	0.00	139.00	0.00	21
15	113.20	243.10	98.50	0.00	0.00	21
16	75.70	182.60	106.60	96.20	0.00	21
17	57.00	60.00	104.00	0.00	183.20	22
18	50.10	94.60	69.50	0.00	0.00	22
19	79.40	135.20	127.80	0.00	0.00	22
20	98.20	258.30	250.50	0.00	0.00	22
21	61.80	49.00	43.20	0.00	0.00	22
22	56.10	22.70	65.60	134.60	0.00	23
23	11.40	27.50	180.70	0.00	188.40	23
24	44.80	45.20	172.40	247.50	0.00	23
25	11.20	80.90	244.80	0.00	1047.90	23
26	15.50	92.70	0.00	0.00	0.00	23
27	162.00	126.30	52.10	0.00	0.00	24
28	60.10	323.30	58.30	250.00	0.00	24
29	55.50	169.10	208.10	0.00	239.90	24
30	105.90	118.90	152.10	0.00	0.00	24
31	146.70	205.50	141.60	164.20	0.00	24

**6) Données pour l'analyse factorielle des correspondances
sur les surfaces occupées par les types des mottes après labour**

Variable	Sd	S1n	S2S3n	Sgtf	Svi	Svs	Indicateur (Traitement x Vitesse x Répétition)
1	58.60	5.70	275.60	2100.20	0.00	67.70	211
2	244.50	7.60	119.50	2097.60	0.00	27.90	211
3	242.00	108.00	22.00	1735.60	0.00	7.40	211
4	196.40	0.00	0.00	2177.60	0.00	32.10	211
5	265.10	0.00	0.00	2234.10	0.00	14.30	221
6	503.50	6.00	117.00	1713.10	0.00	0.00	221
7	54.50	10.60	136.50	2000.20	0.00	45.80	221
8	235.50	0.00	145.90	2138.50	0.00	10.30	221
9	190.90	0.00	49.40	1964.00	0.00	4.60	231
10	106.60	32.20	0.00	1946.70	0.00	0.00	231
11	101.30	0.00	0.00	2332.80	0.00	3.30	231
12	123.40	0.00	0.00	2277.50	0.00	67.50	231
13	231.30	114.40	6.90	1884.20	0.00	0.00	212
14	189.00	51.20	114.70	1975.50	0.00	46.90	212
15	442.40	42.90	0.00	2452.40	0.00	104.40	212
16	197.70	12.40	12.70	2045.30	0.00	3.00	212
17	206.00	4.80	31.90	1833.40	0.00	90.30	222
18	300.70	0.00	0.00	1829.10	0.00	28.60	222
19	233.00	73.90	0.00	1746.30	0.00	36.80	222
20	282.50	12.90	53.80	1920.30	15.60	116.60	222
21	270.90	9.20	19.80	1865.80	0.00	0.00	232
22	44.10	9.30	33.60	2014.10	0.00	24.00	232
23	97.20	34.80	8.40	1615.60	0.00	7.30	232
24	162.60	0.00	16.70	1861.20	11.90	59.40	232
25	175.00	26.20	85.10	1950.40	23.90	92.50	2112
26	217.80	0.00	8.10	2399.80	2.30	6.60	2112
27	400.30	35.20	0.00	1834.00	0.00	11.50	2112
28	260.00	44.60	5.70	1919.70	0.00	13.60	2112
29	153.60	108.60	38.00	1810.90	0.00	2.70	2122
30	288.50	80.00	0.00	2035.40	0.00	1.50	2122
31	361.90	80.60	105.60	1859.10	0.00	21.20	2122
32	97.10	6.80	0.00	2276.10	0.00	46.40	2122
33	140.70	5.30	13.40	1772.90	0.00	44.60	2212
34	101.90	66.20	7.90	2263.10	0.00	0.00	2212
35	165.60	124.90	142.20	1668.40	0.00	0.00	2212
36	65.90	5.60	152.70	2217.90	0.00	57.40	2212
37	206.50	0.00	82.90	2239.40	0.00	16.30	2222
38	220.50	0.00	15.60	2232.90	0.00	19.70	2222
39	131.40	45.90	125.10	1565.70	0.00	97.90	2222
40	165.20	0.00	0.00	2283.40	0.00	10.50	2222
41	235.20	94.00	0.00	2157.40	0.00	0.00	2312
42	220.80	40.10	146.00	2198.40	0.00	91.30	2312
43	259.60	0.00	0.00	2062.60	0.00	0.00	2312
44	268.20	127.00	212.60	2157.60	0.00	55.00	2312
45	112.20	99.80	49.80	1892.10	0.00	6.80	2322

Variable	Sd	S1n	S2S3n	Sgtf	Svi	Svs	Indicateur (Traitement x Vitesse x Répétition)
46	69.80	23.30	108.50	2526.80	0.00	0.00	2322
47	172.60	13.40	5.80	1947.50	0.00	0.00	2322
48	102.50	30.80	14.20	2211.80	0.00	2.20	2322
49	942.80	637.50	91.90	787.00	80.80	55.20	111
50	631.70	454.70	483.40	1007.50	48.80	98.90	111
51	640.50	347.30	610.40	1036.10	43.70	120.80	111
52	655.90	332.50	852.90	772.90	57.90	42.20	111
53	749.50	662.50	71.10	674.10	16.70	119.80	121
54	836.40	585.50	154.10	1050.80	26.40	28.60	121
55	439.10	980.50	67.40	645.20	22.60	43.00	121
56	798.50	476.00	129.70	695.50	0.00	29.90	121
57	531.40	949.70	195.40	685.70	39.50	36.30	131
58	1273.40	136.90	54.60	1207.20	105.90	140.90	131
59	822.80	259.50	338.30	1121.70	22.30	16.40	131
60	1018.50	167.40	388.80	684.80	42.50	61.10	131
61	542.40	686.90	114.80	913.30	73.80	33.70	112
62	335.90	660.10	535.70	818.80	100.40	112.30	112
63	382.20	663.50	409.60	691.00	27.50	47.50	112
64	451.90	568.50	150.70	687.40	25.70	129.20	112
65	552.10	592.50	74.70	694.90	85.10	16.20	122
66	781.30	104.40	527.90	1056.40	94.10	272.60	122
67	438.20	98.30	128.90	752.60	43.30	241.70	122
68	1036.20	9.10	388.40	660.80	63.30	114.50	122
69	1214.60	239.10	349.40	722.90	88.10	64.80	132
70	791.20	309.90	470.50	1154.10	26.70	100.50	132
71	597.90	383.70	123.10	868.40	80.30	38.50	132
72	1266.50	0.00	223.70	576.40	29.40	228.10	132
73	884.50	85.20	77.50	1568.10	27.20	21.20	320
74	1029.60	19.90	71.20	1011.70	54.50	52.00	320
75	1342.60	172.50	0.00	1528.60	33.50	175.20	320
76	1086.10	422.30	0.00	1198.80	56.40	111.70	320
77	577.80	163.90	65.10	1661.00	56.90	142.50	330
78	495.10	77.70	874.40	854.10	3.60	2.50	330
79	465.60	860.60	31.30	904.00	33.30	15.70	330
80	851.00	293.20	181.40	809.90	54.90	172.70	330
81	1249.20	0.00	0.00	1122.60	47.40	37.80	410
82	696.50	713.80	0.00	889.90	118.30	98.80	410
83	1310.10	212.00	290.10	704.00	162.80	33.60	410
84	753.60	504.30	0.00	824.20	121.10	97.30	410
85	852.90	13.20	481.70	821.00	7.80	108.30	420
86	1160.60	314.80	103.40	805.70	39.50	64.80	420
87	1194.20	65.20	56.00	976.10	133.90	0.00	420
88	1442.80	97.90	0.00	1209.40	73.20	65.20	420
89	929.20	140.30	0.00	959.40	4.70	30.00	430
90	669.50	641.50	273.80	1005.20	106.40	180.30	430
91	1043.10	402.90	9.00	846.20	46.60	215.70	430
92	768.00	370.00	0.00	961.00	13.40	11.60	430

**7) Données pour l'analyse factorielle des correspondances
sur les surfaces occupées par les calibres des mottes delta
fissurées et non fissurées après labour**

Variable	5	10	15	20	sup20	Indicateur (Traitement x Vitesse x Répétition)
1	39.50	135.30	165.10	0.00	0.00	211
2	81.20	163.20	131.40	0.00	0.00	211
3	48.20	116.30	186.90	210.40	85.70	211
4	63.40	191.60	0.00	0.00	0.00	211
5	6.60	74.60	183.90	0.00	0.00	221
6	78.10	265.90	94.00	154.60	43.60	221
7	40.90	67.50	0.00	136.50	0.00	221
8	111.80	219.10	95.40	0.00	0.00	221
9	49.60	65.80	85.00	39.80	0.00	231
10	34.00	142.10	0.00	0.00	0.00	231
11	56.60	127.60	0.00	0.00	0.00	231
12	87.50	35.90	175.90	0.00	0.00	231
13	77.30	100.70	116.80	63.20	0.00	212
14	115.50	259.00	0.00	36.20	0.00	212
15	50.10	168.70	58.50	347.70	0.00	212
16	46.10	53.20	149.80	0.00	0.00	212
17	98.40	24.50	0.00	0.00	119.90	222
18	55.40	131.30	46.10	0.00	138.30	222
19	141.00	165.90	0.00	0.00	0.00	222
20	96.10	220.50	78.20	0.00	0.00	222
21	116.50	173.40	137.40	0.00	97.50	232
22	65.20	199.80	88.50	0.00	0.00	232
23	67.40	158.80	55.80	130.70	0.00	232
24	69.60	75.70	186.00	273.40	0.00	232
25	58.30	94.20	346.70	0.00	0.00	2112
26	69.60	106.60	0.00	0.00	78.00	2112
27	55.80	237.10	142.60	0.00	0.00	2112
28	118.00	158.60	79.90	43.40	0.00	2112
29	75.70	141.40	41.20	0.00	63.20	2122
30	66.10	164.50	165.10	0.00	0.00	2122
31	25.90	93.20	322.50	106.50	0.00	2122
32	53.70	105.50	0.00	0.00	0.00	2122
33	55.70	52.60	0.00	51.20	0.00	2212
34	49.80	50.40	98.80	0.00	0.00	2212
35	42.90	144.00	245.90	0.00	0.00	2212
36	43.80	105.10	0.00	134.00	0.00	2212
37	57.90	190.30	128.80	0.00	0.00	2222
38	82.60	153.50	0.00	0.00	0.00	2222
39	26.00	133.40	44.00	125.10	0.00	2222
40	68.90	110.10	53.10	0.00	0.00	2222
41	87.10	181.00	46.40	35.80	0.00	2312
42	43.00	97.30	298.70	0.00	0.00	2312
43	108.10	147.20	0.00	42.10	0.00	2312
44	97.20	149.60	244.10	117.00	0.00	2312
45	106.60	135.90	0.00	0.00	61.60	2322
46	65.80	136.60	60.70	0.00	0.00	2322

Variable	5	10	15	20	sup20	Indicateur (Traitement x Vitesse x Répétition)
47	67.30	136.70	0.00	76.10	0.00	2322
48	56.20	142.40	0.00	98.00	0.00	2322
49	158.00	158.40	442.80	510.80	402.10	111
50	215.80	227.30	279.80	370.20	658.80	111
51	164.10	212.30	236.90	402.90	582.00	111
52	179.70	325.40	151.80	91.90	1103.80	111
53	155.40	61.20	302.80	69.90	893.80	121
54	246.80	214.50	366.40	401.20	347.10	121
55	114.40	233.50	140.50	349.10	649.60	121
56	146.10	170.80	267.80	391.00	441.20	121
57	156.80	149.30	280.00	91.50	998.90	131
58	130.90	95.60	291.10	129.50	817.80	131
59	222.90	114.70	240.70	206.60	635.60	131
60	98.30	136.60	82.10	146.10	1111.70	131
61	129.90	219.30	143.70	311.60	539.50	112
62	150.00	189.30	132.00	0.00	1062.10	112
63	166.20	42.90	114.20	184.20	947.90	112
64	145.50	184.30	247.30	355.20	264.10	112
65	134.90	147.30	116.00	0.00	1405.50	122
66	208.10	86.40	104.50	89.70	924.90	122
67	218.00	103.80	110.50	128.90	875.70	122
68	106.40	208.90	468.80	0.00	649.70	122
69	141.10	158.50	230.20	218.50	1054.70	132
70	130.90	320.00	208.80	150.20	761.80	132
71	189.20	146.70	313.90	454.90	0.00	132
72	118.10	302.40	148.00	150.20	808.30	132
73	197.70	126.30	496.40	226.80	0.00	320
74	173.30	343.00	152.80	275.60	220.10	320
75	159.20	517.50	280.50	268.70	289.20	320
76	105.80	340.20	352.70	187.90	522.00	320
77	146.20	402.90	223.30	111.10	0.00	330
78	98.90	163.00	229.90	116.50	839.00	330
79	223.60	204.20	170.10	69.10	690.50	330
80	147.10	260.50	0.00	0.00	925.90	330
81	43.20	220.40	604.20	0.00	381.40	410
82	158.80	352.20	108.20	429.00	375.60	410
83	95.10	247.70	355.40	603.20	510.80	410
84	79.60	229.40	511.30	237.10	200.50	410
85	100.00	136.30	31.20	92.10	988.30	420
86	274.50	417.20	125.20	103.40	658.30	420
87	175.50	292.60	285.50	158.70	479.80	420
88	219.80	403.30	298.90	375.10	243.60	420
89	130.70	131.70	346.60	163.60	296.90	430
90	170.80	212.20	41.90	122.20	1037.70	430
91	178.10	74.00	189.40	0.00	1013.50	430
92	178.60	218.80	219.80	276.30	244.60	430