

MEMOIRE DE MAITRISE

INRS-EAU

**"INTERDEPENDANCE DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS
DANS UN MODELE DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES
PAR DES PESTICIDES"**

par

Jean Jobidon

Directeur

Jean-Pierre Villeneuve

UNIVERSITE DU QUEBEC

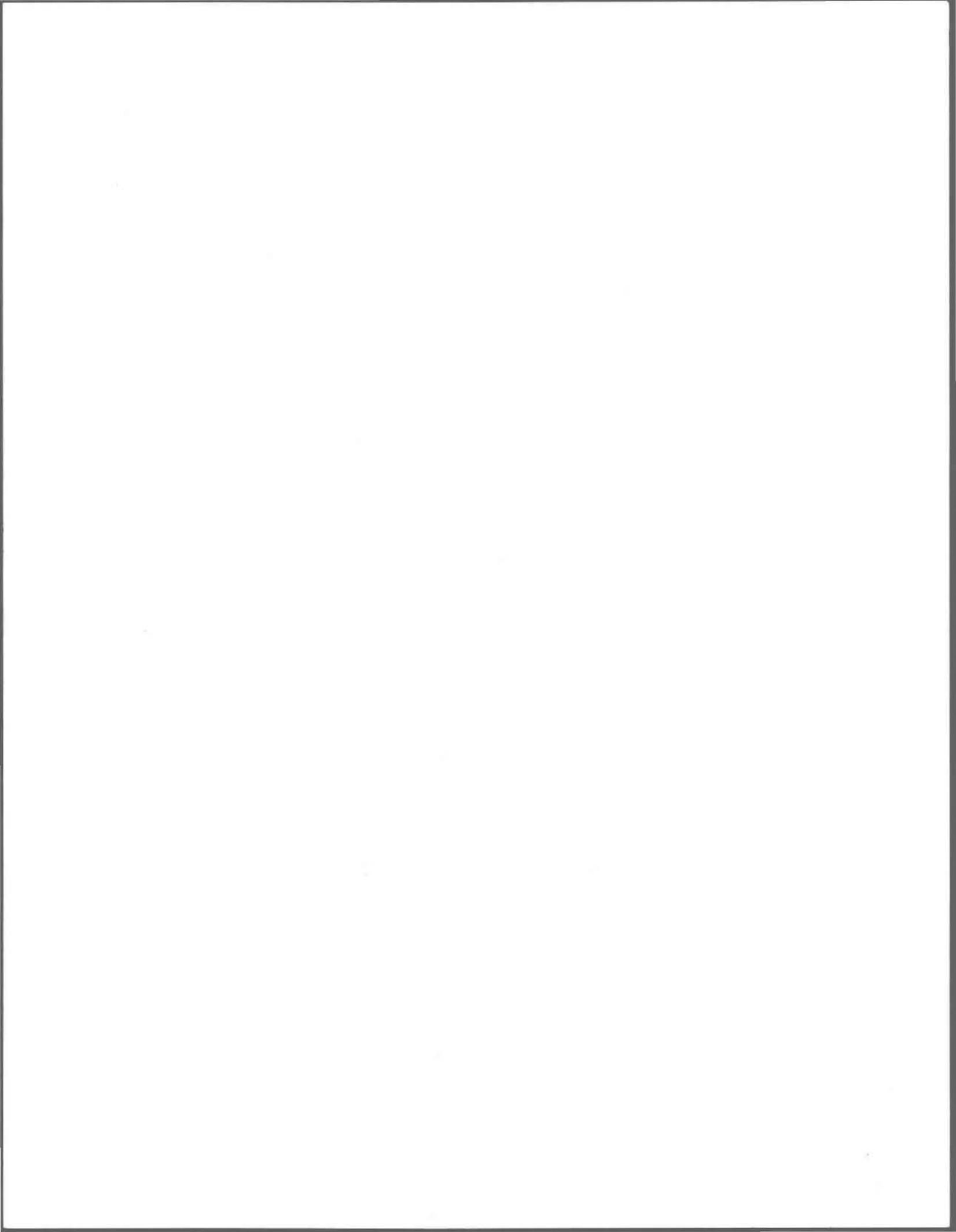
2800, rue Einstein

Suite 105

Québec (Québec)

G1X 4N8

Décembre 1990



RESUME

Le but de cette étude est de vérifier l'impact de l'interdépendance de certains paramètres physiques sur la modélisation de la contamination verticale des sols par des pesticides. Des problèmes reliés à la représentation de la variabilité spatiale des propriétés physiques et à l'estimation du degré d'homogénéité des sols en sont la source.

Des parcelles de deux fermes expérimentales d'Agriculture Québec font l'objet d'une caractérisation. Plusieurs échantillons non-remaniés sont prélevés dans chaque horizon de sol. Des propriétés physiques telles que la conductivité hydraulique, la porosité, la masse volumique, la granulométrie, la proportion de matière organique sont mesurés en laboratoire.

Les distributions statistiques sont établies pour les propriétés mesurées dans chaque horizon de sol. La méthode des corrélations par rangs de Kendall est utilisée et un test du niveau de signification permet d'évaluer le degré d'homogénéité des sites.

Le modèle mathématique "Vulpest" est un outil d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Il a été développé à l'INRS-Eau pour Environnement Canada. Ce modèle est de type stochastique, il est simple d'utilisation et la proximité de ses concepteurs a facilité sa modification en une version hybride permettant la considération de certaines régressions basées sur les corrélations mesurées avec les données des sites réels.

Des simulations ont été faites pour neuf pesticides ayant des propriétés différentes. La version originale du modèle, traitant les paramètres indépendamment, a pu être comparée à la version hybride considérant certaines régressions afin de mesurer l'impact de la prise en compte de l'interdépendance de certaines propriétés physiques des sols.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes. Les différences entre les deux versions sont apparentes pour des événements de faible probabilité au dépassement et pour les pesticides les plus solubles. La considération de l'interdépendance des propriétés physiques dans le modèle entraîne une augmentation de la valeur estimée de la vitesse d'écoulement de l'eau de le sol.

REMERCIEMENTS

Je désire remercier mon directeur le Docteur Jean-Pierre Villeneuve pour son encadrement, son dynamisme et son expérience. Je me dois de remercier aussi le Docteur Olivier Banton, qui a agit à titre de co-directeur et de correcteur interne et sans les conseils de qui cette étude aurait été beaucoup plus ardue.

Egalement, merci au Docteur Bernard Bobée pour ses conseils à propos des méthodes statistiques et de la présentation des résultats.

De plus, j'apprécie la patience et l'endurance de Claude Blanchette et d'Esther Salvano pour leur soutien respectif à la programmation et au laboratoire.

CITATIONS

Acquérir la sagesse, Oh! combien cela vaut mieux que l'or! Et acquérir l'intelligence est préférable à l'argent. Avant l'écroulement, il y a l'orgueil, et avant le faux pas, l'esprit hautain. Mieux vaut être modeste d'esprit avec les humbles que de partager les dépouilles avec les fats.

Proverbes 16:16,18,19

Mais l'homme physique ne reçoit pas les choses de l'esprit de Dieu, car elles sont une sottise pour lui; et il ne peut pas parvenir à les connaître, parce que c'est spirituellement qu'on les scrute. L'homme spirituel, au contraire, scrute toutes choses, mais lui-même n'est scruté par personne.

1 Corinthiens 2:14,15

TABLE DES MATIERES

Page

RESUME.....	i
REMERCIEMENTS	iii
CITATIONS.....	iv
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
PROBLEMATIQUE.....	1
INTRODUCTION.....	3
1. VARIABILITE SPATIALE ET PROPRIETES DES SOLS	4
1.1 Variabilité spatiale du transport dans la zone vadose.....	4
1.1.1 Transport d'un contaminant.....	4
1.1.2 Variabilité spatiale dans les sols.....	5
1.1.3 Modelisation stochastique versus déterministe.....	5
1.1.4 Interdépendance des paramètres d'un modèle stochastique	6
1.2 Mesures des propriétés physiques des sols	7
1.2.1 Contenu en eau	7
1.2.2 Texture des sols.....	8
1.2.3 Densité apparente.....	9
1.2.4 Conductivité hydraulique.....	10
1.2.5 Proportion de matières organiques.....	11
1.2.6 Conductivité électrique et pH	11
1.3 Distributions statistiques et corrélation.....	11
1.3.1 Distributions statistiques des propriétés physiques des sols.....	11
1.3.2 Corrélations entre les propriétés	12
1.4 Interdépendance des propriétés des sols.....	13
2. CARACTERISATION DES SITES ET MESURES DES PROPRIETES DES SOLS	15
2.1 Caractéristiques générales des sites	15
2.2 Forages et échantillonnages.....	15
2.3 Analyses de laboratoires.....	17

TABLE DES MATIERES (suite)

	page
3. DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES PROPRIETES MESUREES	18
3.1 Tendances générales	19
3.1.1 Conductivité hydraulique.....	19
3.1.2 Texture.....	19
3.1.3 Carbone organique.....	19
3.1.4 Porosité et masse volumique sèche.....	19
3.2 Résumé des distributions statistiques	20
4. CORRELATIONS ET REGRESSIONS	23
4.1 Corrélations	23
4.2 Régressions.....	24
5. UTILISATION DU MODELE "VULPEST"	29
5.1 Présentation.....	29
5.2 Paramètres d'entrée	30
5.2.1 Fichier climat.....	30
5.2.2 Fichier culture	30
5.2.3 Fichier pesticide	30
5.2.4 Fichier sols.....	31
5.3 Nombre de simulations requises.....	31
5.4 Modèle hybride considérant les corrélations.....	33
5.4.1 Introduction d'une variable aléatoire dans les régressions.....	33
5.4.2 Détermination de la conductivité hydraulique.....	34
5.4.3 Détermination de la masse volumique sèche	36
5.4.4 Ordre des modifications du modèle hybride.....	37
5.5 Scénarios de comparaisons entre les différents types de modélisations	37
5.5.1 Etape 1: Vulpest original avec les données d'entrée intégrales.....	37
5.5.2 Etape 2: Vulpest hybride avec les données d'entrée intégrales	37
5.5.3 Etape 3: Vulpest original avec des données d'entrée représentatives de l'étape 2	38
5.6 Résultats des modélisations	40

TABLE DES MATIERES (suite)

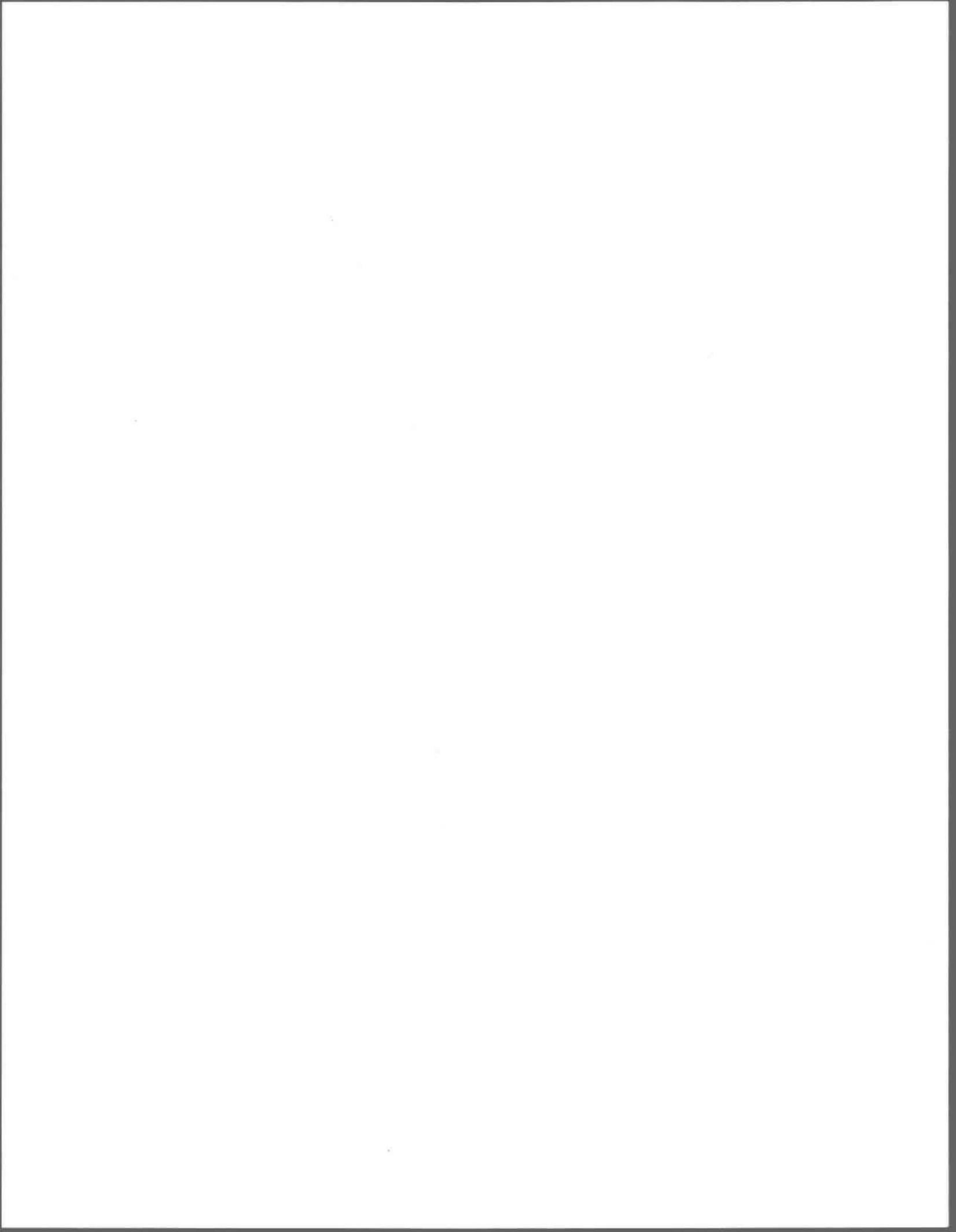
	page
6. DISCUSSION.....	41
6.1 Analyse des résultats.....	41
6.2 Effet de l'interdépendance de certains paramètres sur la quantité de pesticide migrant vers la zone saturée.....	41
6.2.1 Concentrations (ou masses) -vs- solubilité.....	42
6.2.2 Temps d'arrivée -vs- solubilité.....	46
6.2.3 Concentrations (ou masses) -vs- dégradabilité.....	48
6.3 Représentation du degré d'homogénéité d'un site.....	50
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	52
ANNEXE A: CARACTERISATIONS DES SITES.....	A.1
ANNEXE B: RESULTATS D'ANALYSES.....	B.1
ANNEXE C: DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES PROPRIETES DES SOLS.....	C.1
ANNEXE D: CORRELATIONS PAR RANGS DE KENDALL.....	D.1
ANNEXE E: DONNEES D'ENTREE DU MODELE "VULPEST" NON-MODIFIE.....	E.1
ANNEXE F: RESULTATS DES MODELISATIONS.....	F.1

LISTE DES TABLEAUX

	page
2.1 Epaisseurs des horizons à Saint-Augustin	16
2.2 Epaisseurs des horizons à l'Assomption.....	16
3.1 Distributions statistiques de Saint-Augustin.....	21
3.2 Distributions statistiques de l'Assomption	22
4.1 Nombre de tests significatifs au niveau de confiance 5%	24
4.2 Nombre de tests significatifs au niveau de confiance 1%	25
4.3 Corrélations par rangs de Kendall % Sable -vs- % Limon et % Argile	26
5.1 Caractéristiques des régressions	33
5.2 Modifications de certaines distributions statistiques pour le site de Saint-Augustin.....	39
5.3 Modifications de certaines distributions statistiques pour le site de l'Assomption..	39
6.1 Résumé des caractéristiques chimiques des pesticides modélisés.....	42

LISTE DES FIGURES

	page
4.1 Régression % Limon = f (% Sable).....	27
4.2 Régression % Argile = f (% Sable)	27
4.3 Régression Porosité = f (masse volumique sèche)	28
5.1 Variance moyenne de trente modélisations de "n" simulations.....	32
5.2 Classes texturales des sols	34
5.3 Conductivités hydrauliques pour différents sols (Freeze et Cherry).....	35
5.4 Conductivités hydrauliques pour différents sols (Bear)	35
5.5 Densité minérale apparente	36
6.1 Vulpest: versions originale et hybride Concentrations maximales: Saint-Augustin	43
6.2 Vulpest: versions originale et hybride Concentrations annuelles: Saint-Augustin.....	43
6.3 Vulpest: versions originale et hybride Masses cumulées: Saint-Augustin.....	44
6.4 Vulpest: versions originale et hybride Concentrations maximales: L'Assomption	44
6.5 Vulpest: versions originale et hybride Concentrations annuelles: L'Assomption	45
6.6 Vulpest: versions originale et hybride Masses cumulées: L'Assomption.....	45
6.7 Vulpest: versions originale et hybride Temps d'apparition -vs- solubilité (St-Augustin)	47
6.8 Vulpest: versions originale et hybride Temps d'apparition -vs- solubilité (Assomption).....	47
6.9 Vulpest: versions originale et hybride Concentration maximale -vs- dégradabilité (Saint-Augustin)	49
6.10 Vulpest: versions originale et hybride Concentration maximale -vs- dégradabilité (Assomption).....	49



PROBLEMATIQUE

Dans certains pays du proche orient, il est déjà question de l'or incolore que constitue la ressource eau. Parmi les pays avantagés par leurs provisions d'eau douce, le Canada n'est certes pas le plus industrialisé. Pourtant, depuis le début du siècle, la détérioration du milieu naturel par des activités anthropogènes se fait sentir sur la qualité des réserves d'eau potable.

Au Québec, environ 20% de la population s'alimentent en eau potable à partir des eaux souterraines. Cette proportion est cependant à la hausse car des irrégularités temporelles de la qualité des eaux de surface favorisent l'utilisation des eaux souterraines. Par ailleurs, les consommateurs d'eau souterraine sont concentrés dans les zones rurales et utilisent des puits individuels.

Depuis quelques années, l'utilisation intensive de produits chimiques, tels des engrais et des pesticides, soulève beaucoup de questions en rapport avec le transport de ces substances synthétiques vers la réserve d'eau souterraine. Plusieurs cas de contamination des eaux souterraines par des pesticides ont été rapportés aux Etats-Unis dans les états de New-York, du Nebraska, du Wisconsin et de la Californie. Le Québec ne fait pas figure d'exception; par exemple, l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Catherine-de-Portneuf fût contaminée par l'aldicarbe.

La vulnérabilité des eaux souterraines est fonction de la nature des sols ainsi que des caractéristiques bio-physico-chimiques du pesticide utilisé. Ainsi, des efforts furent posés dans le but de comprendre les processus qui régissent le transport des contaminants dans la zone insaturée du sol.

Pour les sources diffuses que sont les épandages agricoles, 2.5 millions de kilogrammes de pesticide (matière active) furent utilisés au Québec en 1978. La nécessité d'avoir un cadre de gestion pour l'homologation et l'utilisation des pesticides se faisait grandement sentir.

Des efforts sont investis dans la réalisation de modèles mathématiques pouvant simuler le transport des pesticides dans les sols. Ces modèles se doivent de représenter adéquatement les conditions de terrains, d'être faciles d'utilisation et peu coûteux. Un des problèmes majeurs rencontrés est de reproduire la variabilité spatiale qui existe dans les propriétés des sols. Dans ce domaine, la modélisation stochastique possède un gros avantage: les distributions statistiques des différents paramètres sont utilisés et permettent de bien représenter la variabilité spatiale des sols.

La modélisation stochastique pose cependant un problème: une hypothèse de base veut que les paramètres utilisés soient indépendants entre eux. Dans les sols, il a été démontré que des corrélations existent entre certaines propriétés physiques (conductivité hydraulique, texture, densité, etc...). Cependant, les incertitudes liées à la mesure de ces propriétés font en sorte que les corrélations calculées sont souvent peu significatives. La présente étude a pour but de vérifier l'impact réel de ces corrélations sur les simulations obtenues par l'application d'un modèle mathématique à deux sites agricoles québécois.

INTRODUCTION

Le problème majeur qui existe lorsqu'un modèle mathématique prétend reproduire un phénomène physique naturel, est la représentation adéquate de la variabilité spatiale physico-temporelle du milieu considéré. En effet, dans la nature, même si le milieu physique est parfaitement homogène, certains processus dynamiques varient en fonction du temps. Par exemple, la conductivité hydraulique d'un milieu non-saturé augmente à mesure que le front de saturation progresse dans le sol. Par ailleurs, la non-homogénéité caractéristique des propriétés physiques des milieux naturels introduit des incertitudes dans la modélisation d'un processus physique. La présente étude considère cette dernière source d'incertitude, la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols. Des recherches bibliographiques sont présentées dans un premier temps et touchent plus particulièrement:

- le transport d'un contaminant dans la zone vadose;
- les mesures, les distributions et les corrélations des propriétés physiques des sols;
- les méthodes pouvant considérer l'interdépendance de certains paramètres dans un modèle mathématique.

Ensuite, les trois points touchés précédemment sont appliqués à deux sites agricoles québécois. Les sites choisis sont des parcelles situées sur deux fermes expérimentales d'Agriculture Québec; une est située à Saint-Augustin de Desmaures dans la région de Québec et l'autre est située à l'Assomption dans la région de Montréal. Ces sites agricoles font l'objet d'une caractérisation et les distributions statistiques de chacune des propriétés physiques retenues sont établies pour chacun des horizons de sols relevés. Une étude de corrélation est faite sur les propriétés des horizons de chacun des sites.

Les résultats des caractérisations physiques sont utilisés pour des simulations du transport de différents pesticides sur les deux sites à l'aide du modèle stochastique "Vulpest" développé à l'INRS-Eau. Les données relatives au climat et à la culture sont

fixées et constantes pour toutes les modélisations. Une version hybride de ce modèle est conçue de façon à permettre la considération de certaines des corrélations mesurées et généralisables pour les deux sites. Les mêmes simulations que précédemment sont faites avec la version hybride du modèle. La comparaison des résultats obtenus avec les deux versions du modèle sur les deux sites permet de vérifier si l'hypothèse d'interdépendance des paramètres influence la qualité de la modélisation. Comme cette comparaison est faite pour plusieurs pesticides, les effets de la solubilité et de la dégradabilité de ces derniers peuvent être pris en compte.

1. VARIABILITE SPATIALE ET PROPRIETES DES SOLS

1.1 Variabilité spatiale du transport dans la zone vadose

1.1.1 Transport d'un contaminant

Le transport d'un contaminant dans la zone vadose vers la nappe phréatique, résultant d'une application uniforme en surface, est généralement résolu en ne considérant que l'axe vertical. L'équation du transport doit considérer les phénomènes d'advection, d'adsorption, de dispersion, de dégradation et de transformation du contaminant interagissant dans le milieu bio-physico-chimique que constitue le sol (Jones et al., 1986). Les termes de l'équation, basés sur le principe de conservation de la masse et de l'énergie, sont des représentations d'une ou plusieurs lois physiques. Le système résultant est souvent complexe et sa résolution analytique n'est pas toujours possible. La solution est donc généralement numérique (Villeneuve et al., 1987a).

Il paraît important de développer des modèles généraux, permettant de prédire la distribution d'un contaminant altéragène introduit dans la zone vadose, afin de connaître sa concentration dans le temps et l'espace (Bresler and Dagan, 1981).

L'approche traditionnelle, consistant à considérer les sols homogènes et à résoudre l'équation de convection-dispersion, est utilisée dans le domaine saturé avec un succès relatif. Cependant, l'application de cette solution est moins avantageuse dans le domaine non-saturé où jusqu'à 36 % de l'eau peut-être considérée immobile. Le coefficient de dispersion correspondant est jusqu'à 80 fois plus élevé (De Smedt et

al., 1986). Les hétérogénéités rencontrées dans les propriétés des sols pourraient restreindre l'utilisation de certains types de modèles.

1.1.2 Variabilité spatiale dans les sols

La variabilité peut-être qualifiée d'intrinsèque ou d'extrinsèque. Les variations naturelles dans la structure du sol comme sa texture et sa teneur en matière organique sont intrinsèques et elles peuvent influencer grandement des propriétés telles que la conductivité hydraulique ou le coefficient d'adsorption. Par ailleurs, les variations occasionnées par la gestion agricole comme le taux d'épandage et la solubilité d'un pesticide ou les techniques d'irrigation sont extrinsèques. Relativement peu d'études in situ ont porté sur la variabilité spatiale des paramètres intrinsèques dans les sols (Rao et Wagenet, 1985).

Généralement, l'écoulement vertical à travers les pores du sol est l'unique composante de vitesse attribuée (Bresler et Dagan, 1981). De plus, la scarification et le labourage du sol rendent la variabilité encore plus importante dans l'horizon de surface (Bashan et Wolowelsky, 1987). Sur le terrain, les distributions spatiales de paramètres comme la conductivité hydraulique, la teneur en eau, la texture et la densité brute furent grandement étudiées. Il apparaît que les coefficients de variation des propriétés hydrauliques, rapport de l'écart type sur la moyenne pour un ensemble de mesures, sont de beaucoup supérieurs à ceux des propriétés physiques comme la texture et la densité brute (Carsel et Parrish, 1988).

1.1.3 Modélisation stochastique versus déterministe

Toujours en rapport avec le transport d'un contaminant dans la zone vadose, les processus complexes impliqués favorisent l'utilisation de modèles conceptuels. Ce type de modélisation consiste à formuler les lois physiques qui représenteront le problème à résoudre. Les modèles conceptuels déterministes utilisent des valeurs ponctuelles des paramètres d'entrée, tandis que les modèles conceptuels stochastiques utilisent des distributions statistiques (Villeneuve et al., 1987a). Une certaine confrontation peut survenir entre ces deux philosophies de modélisation conceptuelle: laquelle est la plus apte à représenter la variabilité spatiale rencontrée sur le terrain?

Afin d'obtenir des valeurs d'entrée représentatives pour un modèle déterministe, une caractérisation exhaustive du site à modéliser doit être faite. Une telle démarche coûte chère et nécessite beaucoup de temps (Rao et Wagenet, 1985). De plus, certains paramètres comme la biodégradabilité sont extrêmement variables dans le temps et l'espace (Villeneuve et al., 1987a). D'un autre côté, une estimation des distributions des paramètres, et l'utilisation de ces distributions dans un modèle stochastique peuvent conduire à des résultats satisfaisants (Bresler et Dagan, 1981).

En admettant que les données servant à l'estimation des distributions soient exactes, le modèle stochastique apparaît comme un outil plus prédictif, et le traitement des incertitudes y est généralement simple (Carsel et Parrish, 1988 ; El-Kadi, 1987). Cependant, la plupart des modèles stochastiques conçus jusqu'à aujourd'hui ne résolvent pas l'équation non-linéaire de l'écoulement et ne considère donc pas l'interdépendance entre la conductivité hydraulique (K) et les propriétés des sols (El-Kadi, 1987).

Par ailleurs, il a été démontré que pour une modélisation stochastique, l'effet de la variabilité de la dispersion dans l'équation convection-dispersion est faible en comparaison à l'effet de la variabilité du taux d'infiltration dans certaines conditions (Bresler et Dagan, 1981; Villeneuve et al., 1987a). Pour des conditions réelles de terrain, l'omission du terme dispersif dans l'équation n'entraîne pas d'erreur significative et cela diminue grandement le temps de calcul (Villeneuve et al., 1987a).

1.1.4 Interdépendance des paramètres d'un modèle stochastique

La conductivité hydraulique (K) est la variable clé dans la plupart des modèles hydrogéologiques. Dans l'approche traditionnelle, la variabilité des propriétés hydrauliques est décrite par une variable aléatoire à deux caractéristiques; la moyenne et l'écart type. Cette approche néglige les corrélations qui peuvent être importantes entre la conductivité hydraulique et la structure du sol (Byers et Stephens, 1983).

Afin d'éviter le temps nécessaire à la caractérisation de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique, des relations empiriques peuvent être faites entre cette dernière et des caractéristiques de texture du sol (Carsel et Parrish, 1988). Ces relations sont généralement applicables pour les milieux poreux (Masch et Denny, 1966). Cependant, le gonflement ou le retrait dans le cas des sols argileux influe grandement la conductivité hydraulique (Russo et Bresler, 1981; Bresler et al., 1984).

Dans la zone non-saturée du sol, l'air emprisonné dans les vides et l'eau adsorbée aux grains du sol font que la conductivité hydraulique du milieu est plus faible que celle qui prévaut dans un milieu saturé. Lors d'une pluie, à mesure que le sol devient plus saturé, la conductivité hydraulique augmente avec le temps et rejoint sa valeur maximale à saturation. Après la pluie, le phénomène inverse se produit. Dans un modèle stochastique, il est possible d'établir une corrélation croisée entre la distribution de la teneur en eau du sol et la distribution de la conductivité hydraulique. Des simulations théoriques ont démontré qu'en apportant une telle modification, les valeurs moyennes du taux d'infiltration sont inchangées. Cependant, les coefficients de variation correspondant sont trois fois plus petits (El-Kadi, 1987).

1.2 Mesure des propriétés physiques des sols

1.2.1 Contenu en eau

Les appareils de type sonde à neutrons offrent aujourd'hui un moyen rapide, se prêtant bien aux analyses in situ de redistribution de l'eau dans les sols. Ces appareils hautement sophistiqués ont une précision relativement bonne pour connaître, en un temps donné, la teneur en eau d'un sol à plusieurs endroits (Wagenet et al., 1984; Greminger et al., 1985). Cette technique consiste à mesurer le flux de particules émis et reçu d'un bout à l'autre de la sonde enfoncée dans le sol en place. Ces systèmes électroniques permettent des lectures directes de plusieurs propriétés physiques dont le contenu en eau.

Cependant, la méthode conventionnelle est encore largement utilisée. Cette méthode consiste à mesurer le contenu en eau en laboratoire mais elle pose trois problèmes importants:

- Un soin particulier doit être apporté à la conservation des échantillons afin de minimiser l'évaporation.
- Certains méthodes de mesure requièrent des échantillons de sol non remaniés (carottes).
- Le volume de travail au laboratoire en fonction du nombre d'échantillons devient rapidement important.

Trois valeurs de contenu en eau peuvent être calculées pour chacun des échantillons et deux nécessitent des échantillons non remaniés. La teneur en eau du sol lors de son échantillonnage est mesurée par séchage de 10 à 1000 grammes de sol remanié, dépendamment de la grosseur des particules (Black, C.A., 1965; BNQ 2501-170, 1981). Des valeurs du contenu en eau correspondant à plusieurs potentiels de pression peuvent être mesurées. Ces conditions sont reproduites en appliquant une pression d'air sur une carotte de sol non remanié qui est saturée au départ. Lorsque le drainage est terminé, la carotte peut-être remaniée et une teneur en eau par séchage est effectuée (Williams et al., 1987; Wood et al., 1987; Heard et al., 1988).

1.2.2 Texture des sols

La texture des sols fait référence à la répartition de la grosseur des grains dans un sol naturel. Cette propriété est souvent appelée la granulométrie.

Sur le terrain, une caractérisation visuelle peut donner des renseignements précieux concernant la présence d'hétérogénéités, de strates en minces couches ou de réseaux de macropores (Byers et Stephens, 1983). De plus, une personne expérimentée pourra déterminer avec passablement de fiabilité la texture d'un dépôt.

L'analyse granulométrique, faite en laboratoire, est la mesure des proportions relatives de certaines classes de diamètre de particules. Pour un matériel grossier, cette analyse s'effectue par passage de l'échantillon de sol à travers une colonne de tamis

dont les ouvertures sont décroissantes. Pour les sols, l'ouverture de tamis minimum suggérée est d'environ 0.074 mm (Bowles, J.E., 1970). Lorsque la granulométrie est désirée pour des particules de diamètres inférieurs à 0.074 mm, l'analyse granulométrique est faite par un essai de sédimentation des particules dans une colonne de liquide. Cette dernière méthode est basée sur le fait que les plus grosses particules en suspension se déposent plus rapidement. Des mesures de la densité de la solution sont prises avec un hydromètre à différentes périodes de la sédimentation. Ces mesures permettront de tracer la courbe granulométrique des particules fines de l'échantillon. Des normes concernant ces essais sont émises par différents organismes et quelques variantes des techniques expliquées précédemment peuvent être rencontrées (NQ 2501-025, 1987). La méthode par sédimentation, souvent appelée méthode de l'hydromètre, est couramment utilisée (Byers et Stephens, 1983; Wagenet et al., 1984; Williams et al., 1987).

1.2.3 Densité apparente

La densité apparente (ou densité brute) est le rapport entre la masse sèche et le volume non-remanié d'un échantillon de sol. Cette densité apparente peut-être calculée in situ ou en laboratoire sur une carotte de sol intact.

Sur le terrain, certains appareils de type sonde à neutrons peuvent donner directement une évaluation de la valeur de la densité brute à un endroit donné (voir 2.1 Contenu en eau).

Lorsqu'un carottier est utilisé et que des cylindres de sol non-remanié sont prélevés, la détermination de la densité apparente est une mesure simple à effectuer. Le volume de l'échantillonneur est ordinairement connu, il ne reste donc qu'à peser le sol prélevé après son séchage à l'étuve. Le rapport masse sèche sur le volume de la carotte est la densité brute (Black, C.A., 1965). Cette procédure simple et peu coûteuse est pratique courante lors de la caractérisation des horizons d'un sol. Cependant, plusieurs mesures doivent être faites pour obtenir une bonne estimation de la propriété et de sa variabilité (Cassel et Bauer, 1975).

1.2.4 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique saturée est une mesure de l'aptitude d'un sol saturé à la percolation de l'eau. Cette mesure peut-être faite sur place ou approchée en laboratoire par des essais sur des échantillons plus ou moins remaniés.

En réalité dans un dépôt naturel, la conductivité hydraulique saturée varie en fonction de l'axe d'écoulement considéré. Généralement, la conductivité hydraulique mesurée dans l'axe horizontal est supérieure à celle mesurée dans l'axe vertical (Chason et Siegel, 1986). De plus, les hétérogénéités locales jouent un rôle important lorsque la conductivité d'un horizon de sol doit être estimée. Les perméamètres sont des appareils de terrain qui permettent d'obtenir des mesures globales (toutes directions) de la conductivité hydraulique saturée. Ces appareils sont constitués d'une chambre cylindrique remplie d'eau grâce à laquelle, une charge hydraulique peut être appliquée dans le sol. En introduisant dans une équation d'écoulement, la variation du potentiel hydraulique appliquée dans le sol en fonction du temps, la conductivité hydraulique saturée peut-être déduite (Reynolds et Elrick, 1985; Lee et al., 1985).

Afin de considérer le transport vertical sur un long intervalle de temps, des colonnes de sol représentatives d'un site peuvent être construites et installées en place. Une charge constante est appliquée en surface, et un contenant permet de récolter l'eau percollée à la base de la colonne (Heard et al., 1988).

En laboratoire, des essais de perméabilité sont effectués sur des carottes de sol. Les carottes de sol sont prélevées selon l'orientation désirée dans le dépôt naturel; le diamètre et la longueur suggérés étant de 7.5 à 10 cm (McIntyre, 1974). Une méthode simple de détermination de la conductivité hydraulique saturée et celle de la charge constante (Black, C.A., 1965). Pour des sols fins ou organiques la méthode du perméamètre à charge variable est ordinairement utilisée (Chason et Siegel, 1986).

1.2.5 Proportion de matières organiques

Plusieurs méthodes quantitatives existent pour la détermination de la teneur en carbone organique des sols. Certaines de ces méthodes impliquent du matériel électronique sophistiqué (Tabatabai et Bremner, 1970); d'autres procèdent par titration d'un réactif oxydant (Black, 1965).

Une méthode simple et rapide permet d'estimer la teneur en matières organiques dans les sols par perte au feu. Cette méthode est peu précise, elle est employée pour des sols riches en matières organiques ou lorsqu'une grande précision n'est pas requise. Elle consiste à mettre au four à 375 degrés centigrade, un échantillon (environ 10 grammes) de sol sec préalablement pesé. Seize heures plus tard, l'échantillon est placé au dessiccateur pour son refroidissement. Les cendres sont ensuite pesée à la température ambiante. La proportion de matière organique correspond au rapport de la masse perdue (lors du séjour de l'échantillon au four) sur la masse totale sèche pesée avant l'essai (Bell, 1964).

1.2.6 Conductivité électrique et pH

Ces deux propriétés physiques peuvent être mesurées dans un mélange sol:eau de rapport 1:1 ou dans un mélange sol:CaCl₂ 0.01M de rapport 1:2 (Black, 1965; McKeague, 1977).

1.3 Distributions statistiques et corrélations

1.3.1 Distributions statistiques des propriétés physiques des sols

Plusieurs études ont porté sur la variabilité spatiale des propriétés physiques intrinsèques des sols. Des tendances générales peuvent être établies à propos des types de distributions statistiques rencontrés pour différentes propriétés. En général, il est admis que les propriétés mesurées exprimant des capacités (teneur en eau, densité, granulométrie, proportion de matière organique, etc...) sont distribuées normalement. Par ailleurs, des propriétés exprimant des flux (vitesse, taux de dégradation, etc...) sont plutôt distribuées de façon log-normale. La variabilité des paramètres est ordinairement

la plus grande suivant l'axe vertical (Cassel et Bauer, 1975; Byers et Stephens, 1983; Wagenet et al., 1984; Reynolds et Elrick, 1985; Chason et Siegel, 1986; Heard et al., 1988).

1.3.2 Corrélations entre les propriétés physiques

La détermination de corrélations entre certaines propriétés physiques est souvent peu significative étant donnée la variabilité importante rencontrée dans les sols. Les corrélations observées lors de la plupart des études sont rarement généralisables mais, quoiqu'il en soit, les résultats de ces études peuvent indiquer des tendances à vérifier.

Reynolds et Elrick (1985) rapportent des régressions entre la teneur en matière organique versus la proportion d'argile et versus la profondeur, montrant des coefficients de corrélation de .91 et .96 respectivement.

Le coefficient d'adsorption est aussi étroitement corrélé ($r=0.93$) avec la teneur en matière organique pour l'horizon de surface du site étudié par Wood et al. (1987). L'adsorption est également corrélée avec la proportion de sable ($r=0.49$), de silt ($r=0.44$) et d'argile ($r=0.213$). Une régression multiple faite avec toutes les propriétés donne un R^2 de 0.861. Pour les horizons inférieurs, les corrélations sont beaucoup plus faibles.

Williams et al. (1987) remarquent que des corrélations peuvent exister entre les différentes propriétés d'un même horizon de sol. Une analyse de corrélation multiple démontre que la densité apparente est faiblement liée aux proportions d'argile, de silt et de sable ($r=0.26$, 0.14 , et -0.21 respectivement). Le contenu en eau est le plus corrélé avec les proportions d'argile, de silt et de sable ($r=0.61$, 0.49 , et -0.60 respectivement). Le niveau de confiance utilisé est de 1%.

Lors de l'étude de l'écoulement vertical dans un matériel sableux au Nouveau-Mexique, Byers et Stephens (1983) ont décelé des similarités entre la conductivité hydraulique et la texture du sol. La meilleure corrélation a été remarquée entre le log de la conductivité et le diamètre de la fraction 10% plus fine (d_{10}) des échantillons de sol. Le

coefficient de corrélation correspondant est de 0.55 avec un niveau de confiance de 1%. Les auteurs admettent que la corrélation n'est pas suffisamment bonne pour justifier l'établissement d'une formule empirique, mais il est suggéré de considérer un paramètre supplémentaire représentant la compacité (densité, porosité...) dans un modèle de régression multiple.

Les caractéristiques physiques et les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées par Heard et al.(1988) sur deux sites (4 parcelles par site) en Indiana (USA), sont utilisées. Les mesures proviennent de l'horizon de surface (0-40 cm): la conductivité hydraulique saturée est mesurée avec une charge constante appliquée sur une colonne de sol en place et les mesures de densité sont faites par une méthode différente pour chaque site (excavation et carotte de sol). Une régression linéaire faite entre la densité brute du sol (entre 7.5 et 23.5 cm) et la perméabilité saturée moyenne mesurée donne un coefficient de corrélation de -0.95.

Des études menées par deux équipes de chercheurs, Bresler et al.(1984) et Wagenet et al.(1984) montrent l'influence de la variation spatiale de la salinité d'un sol et de sa texture sur la variabilité de la conductivité hydraulique. La matrice de corrélation entre plusieurs paramètres, représentant les deux propriétés précitées (salinité et texture) et la conductivité hydraulique, est calculée. La régression multiple réalisée montre que ces deux propriétés expliquent environ 25% de la variabilité de la conductivité hydraulique.

1.4 Interdépendance des propriétés des sols

Les relations d'interdépendances mesurées entre les propriétés des sols ne sont pas généralisables. En effet, la variabilité et les corrélations des caractéristiques physiques rencontrées sur le terrain sont propres à chaque site. Les modèles stochastiques conçus jusqu'à présent posent l'hypothèse d'indépendance des paramètres entre eux. Ces modèles se voulant généraux, il paraît délicat d'y introduire certaines corrélations directes qui pourraient restreindre l'utilisation de ces modèles. Cependant, Warrick et al.(1977) présentent la possibilité d'introduire des relations normales bivariées dans les modèles utilisant la simulation Monte-Carlo. Le coefficient de corrélation entre deux paramètres pourrait être une variable d'entrée supplémentaire

du modèle, et, lors de chaque simulation, une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance unitaire viendrait pondérer la détermination du paramètre dépendant. La taille minimale de l'échantillon requise pour établir les distributions est fixée à vingt (20) éléments.

2. CARACTERISATION DES SITES ET MESURES DES PROPRIETES DES SOLS

2.1 Caractéristiques générales des sites

Les deux sites retenus pour l'étude sont situés sur des fermes expérimentales d'Agriculture-Québec; à Saint-Augustin-de-Desmaures (région de Québec) et à l'Assomption (région de Montréal).

Le site de Saint-Augustin consiste en une petite parcelle (30m x 70m) cultivée avec du maïs. Les pesticides qui y sont utilisés sont l'atrazine, le carbofurane et le fonofos.

Le site de l'Assomption consiste en une petite parcelle (25m x 50m) cultivée avec de la luzerne. Les pesticides qui y sont utilisés sont la simazine, le carbofurane et le diméthoate.

2.2 Forages et échantillonnages

Le site de Saint-Augustin a été visité à trois reprises (14, 20 juin, et 5 juillet 1988) tandis que le site de l'Assomption a été visité pendant la semaine du 11 au 14 juillet 1988. Les schémas présentant la localisation des points d'échantillonnage sont fournis à l'annexe A (figures A-1 et A-2).

Pour le creusage des forages, une tarière est utilisée. Un ou deux forages préliminaires sont réalisés jusqu'à une profondeur approximative de 1.5 mètre afin de déterminer l'épaisseur des principaux horizons de surface du sol. Ces épaisseurs connues, des échantillons sont prélevés au milieu de chaque horizon de sol. Les tableaux no. 2.1 et 2.2, fournis ci-après, présentent les valeurs des épaisseurs de chaque horizon mesurées pour les deux sites. Les numérotation des horizons utilisant les lettres A, B et C ne réfèrent nullement à la définition et taxonomie pédologiques usuelles.

Tableau 2.1: Epaisseur des horizons à St-Augustin

HORIZONS DE SOL			
	HORIZON	EPAISSEUR	DISTRIBUTION PROPOSEE
A U G U S T I N	A	35 cm	DISCRETE valeur = 35 cm
	B	40 cm	DISCRETE valeur = 40 cm
	C	40 cm	DISCRETE valeur = 40 cm

Tableau 2.2: Epaisseur des horizons à l'Assomption

HORIZONS DE SOL			
	HORIZON	EPAISSEUR	DISTRIBUTION PROPOSEE
A S S O M P T I O N	A	30 cm	DISCRETE valeur = 30 cm
	B	50 cm	DISCRETE valeur = 50 cm
	C	45 cm	DISCRETE valeur = 45 cm

Les échantillons sont prélevés dans les trois premiers horizons de chaque site à raison de vingt-cinq (25) échantillons par horizon. Le prélèvement est effectué à l'aide d'un carottier Intrameca permettant de récupérer un échantillon non remanié ayant un diamètre de 5 cm et une hauteur de 6 cm. Le schéma de l'échantillonneur Intrameca est fourni à l'annexe A (figure A-3). De plus, des échantillons de sol remaniés sont prélevés aux mêmes niveaux que les échantillons non remaniés par alésage du trou à la tarière.

2.3 Analyses de laboratoire

Les carottes prélevées sont soumises à un essai de conductivité hydraulique à charge constante. Cet essai est réalisé grâce à un montage dont un schéma est présenté à l'annexe A (figure A-4). En appliquant une charge constante (H), à travers la section (A) d'un cylindre de sol de longueur (L), un volume d'eau percolé (V) est récolté pendant un certain temps (T). La conductivité hydraulique est définie comme étant (expérience de Darcy):

$$K \text{ (cm/sec)} = \frac{V \text{ (cm}^3\text{)} \times L \text{ (cm)}}{A \text{ (cm}^2\text{)} \times T \text{ (sec)} \times H \text{ (cm)}}$$

Les carottes non remaniées de volume (V) sont ensuite pesées à l'état saturé avec le carottier (W_T). La carotte est ensuite brisée et son contenu est séché. Le carottier vide est pesé (W_C) ainsi que son contenu maintenant sec (W_S). La masse volumique sèche (MVSEC) et la porosité (PORO) sont calculés comme suit:

$$\text{MVSEC (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_S \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{PORO (\%)} = \frac{[W_T \text{ (g)} - W_C \text{ (g)} - W_S \text{ (g)}] \times 1 \text{ cm}^3/\text{g}}{V \text{ (cm}^3\text{)}} \times 100\%$$

Un essai de sédimentation est pratiqué sur une fraction du contenu de la carotte séchée. La méthode de l'hydromètre utilisée, est décrite par la procédure normalisée NQ 2501-025 (87-10-30) du bureau de normalisation du Québec. Par cette méthode, la

courbe granulométrique des particules comprises entre 1 micron et 2 mm est calculée. Les proportions de sable (SAB), de limon (LIM) et d'argile (ARG) de chaque échantillon sont tirées de l'interprétation de la courbe.

Le pourcentage de matière organique (MATORG) est calculé par l'essai de perte au feu. Un échantillon de sol sec de poids connu (W_S environ 10 grammes) est placé au four à 375°C pendant 16 heures. Les cendres sont pesées (W_C). Le pourcentage de matière organique est:

$$\text{MATORG (\%)} = \frac{W_S \text{ (g)} - W_C \text{ (g)}}{W_S \text{ (g)}}$$

Le pourcentage de carbone organique (C-ORG) est calculé à l'aide du facteur de conversion 1.724, généralement admis dans la littérature (Lyman et al., 1982):

$$\text{C-ORG (\%)} = \frac{\text{MATORG (\%)}}{1.724}$$

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons des trois horizons pour les deux sites étudiés sont présentés à l'annexe B. Les tableaux B-1, B-2 et B-3 contiennent les résultats d'analyses de Saint-Augustin pour les horizons A,B et C respectivement. Les tableaux B-4, B-5 et B-6 contiennent les résultats d'analyses de l'Assomption pour les horizons A,B et C respectivement.

3. DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES PROPRIETES MESUREES

Les graphiques, représentant les distributions statistiques des propriétés physiques étudiées pour chacun des trois (3) horizons de sol des deux (2) sites, sont fournies à l'annexe C (figures C-1 à C-42). Sont représentés, l'histogramme de fréquence des échantillons étudiés et la fonction densité de probabilité correspondante calculée.

3.1 Tendances générales

3.1.1 Conductivité hydraulique

Dans les six (6) horizons étudiés la distribution statistique des valeurs mesurées est bien décrite par une loi log-normale. Ceci est en accord avec la littérature avançant que les paramètres représentant des flux sont ainsi distribués.

3.1.2 Texture

Pour quatre (4) des six (6) horizons de sols, les distributions associées aux mesures du contenu en sable, en limon et en argile sont moins bien définies. Le choix d'utiliser des distributions uniformes est retenu. Dans les horizons A et C du site de Saint-Augustin, la représentation des distributions des propriétés de texture est faite par une loi normale.

3.1.3 Carbone organique

Des lois normales sont choisies pour représenter la distribution statistique du carbone organique dans les six (6) horizons de sol. Quelques mesures sont jugées non représentatives. Ces valeurs erronées peuvent provenir de deux (2) sources:

- La méthode de mesure de la matière organique est imprécise et cela peut engendrer des erreurs dans le calcul du carbone organique.
- Les horizons de sol étant inclus dans le premier mètre de surface, des débris végétaux (feuilles, morceaux de racine, etc...) peuvent causer des mesures singulières élevées de la matière organique.

3.1.4 Porosité et masse volumique sèche

Ces propriétés se calculent en considérant le volume de l'échantillonneur cylindrique ainsi que les poids du contenu en eau et du sol sec. L'intrusion d'un morceau de racine, d'un cailloux ou une compaction de l'échantillon lors de son

prélèvement, peuvent occasionner des valeurs singulières de la porosité et de la masse volumique. Quoiqu'il en soit, la représentation de la distribution statistique de ces propriétés, par des lois normales est adéquate pour tous horizons de sol considérés; exception faite de la masse volumique dans l'horizon C de l'Assomption qui est représenté par une loi uniforme.

3.2 Résumé des distributions statistiques

Deux tableaux, résumant le choix des distributions statistiques, sont présentés. Ce sont ces distributions qui seront utilisées pour chaque site lors d'une première étape de modélisations.

Abbréviations:

- LOG : loi log-normale
- NORM: loi normale
- UNIF: loi uniforme
- M : moyenne
- ET : écart-type
- BI : borne inférieure
- BS : borne supérieure

Tableau 3.1: Distributions statistiques de Saint-Augustin

PARAMETRE	HORIZON "A"	HORIZON "B"	HORIZON "C"
K (m/sec)	LOG M:0.33E-6 ET:0.80E-6	LOG M: .62E-6 ET: .10E-5	LOG M: .76E-6 ET: .20E-5
% SABLE	NORM M:53.3 ET:1.7	UNIF BI:40.8 BS:67.3	NORM M:66.0 ET:4.5
% LIMON	NORM M:24.7 ET:1.2	UNIF BI: 19.0 BS: 31.2	NORM M:19.5 ET:4.2
% ARGILE	NORM M:22.1 ET:1.7	UNIF BI: 12.3 BS: 28.2	NORM M:14.5 ET:3.3
% CARBONE ORGANIQUE	NORM M:2.3 ET:0.45	NORM M:1.7 ET:0.6	NORM M:1.15 ET:.28
POROSITE (%)	NORM M:44.7 ET:4.0	NORM M:46.0 ET: 3.9	NORM M:44.0 ET:4.2
DENSITE APP. SECHE (g/cc)	NORM M:1.50 ET:.08	NORM M:1.41 ET: 0.1	NORM M:1.50 ET:.09

Tableau 3.2: Distributions statistiques de l'Assomption

PARAMETRE	HORIZON "A"	HORIZON "B"	HORIZON "C"
K (m/sec)	LOG M: .58E-6 ET: .35E-6	LOG M: .90E-6 ET: .20E-5	LOG M: .25E-6 ET: .20E-6
% SABLE	UNIF BI: 76.7 BS: 86.1	UNIF BI: 40.0 BS: 96.2	UNIF BI: 54.9 BS: 95.6
% LIMON	UNIF BI: 6.2 BS: 11.0	UNIF BI: 0.4 BS: 23.4	UNIF BI: 1.3 BS: 23.6
% ARGILE	UNIF BI: 6.5 BS: 13.1	UNIF BI: 3.0 BS: 37.4	UNIF BI: 3.1 BS: 21.5
% CARBONE ORGANIQUE	NORM M:1.75 ET:.19	NORM M:0.72 ET: .18	NORM M:0.55 ET:.15
POROSITE (%)	NORM M:40.0 ET:3.5	NORM M:42.6 ET:4.5	NORM M:39.0 ET:5.5
DENSITE APP. SECHE (g/cc)	NORM M:1.61 ET:.06	UNIF BI: 1.4 BS: 1.7	NORM M:1.65 ET:.13

4. CORRELATIONS ET REGRESSIONS

4.1 Corrélations

Les distributions des propriétés mesurées n'étant pas toutes normales, une méthode non-paramétrique de détermination des coefficients de corrélation est utilisée. Afin de conserver les relations d'ordre spatial entre les propriétés, la méthode de corrélation par rang de Kendall est retenue.

Dans la méthode de Kendall, les valeurs mesurées d'une première propriété sont mises en ordre croissant. Cet arrangement du premier vecteur de valeurs détermine l'ordre des mesures des autres propriétés entre lesquelles le coefficient de corrélation doit être calculé. Le coefficient de corrélation de Kendall est une mesure du degré d'harmonie entre les différentes variables et il s'exprime par une valeur comprise entre -1 et 1.

Le coefficient de corrélation de Kendall (r_k) est calculé à l'aide du logiciel "Statgraphics" (STSC inc, 1986) pour évaluer les corrélations entre les propriétés physiques de chacun des horizons de sol considérés. Les coefficients " r_k " obtenus, sont ensuite transformés en une variable "t" qui est distribuée normalement. Cette variable "t" peut être utilisée pour mesurer le niveau de signification des corrélations. La variable "t" est définie comme suit (Legendre et Legendre, 1979), en fonction de la taille de l'échantillon (n):

$$t = \text{ABS} \left[\left[r_k \sqrt{\frac{9n(n-1)}{2(2n+5)}} \right] - \left[\sqrt{\frac{18}{n(n-1)(2n+5)}} \right] \right]$$

Un test de signification est effectué aux niveaux de confiance 5% et 1% par comparaison avec les valeurs correspondantes à une loi normale soit 1.96 et 2.58 respectivement.

Les résultats du calcul des coefficients de corrélation et du test de signification sont présentés, pour les trois horizons de chacun des deux sites étudiés, à l'annexe D.

4.2 Régression

Dans le but d'établir des régressions généralisables à l'ensemble des horizons entre certaines propriétés, les tableaux présentés ci-après font ressortir le nombre de tests significatifs pour les deux niveaux de confiance considérés. Dans ces tableaux, le nombre maximum possible de tests significatifs correspond au nombre d'horizons étudiés, soit six (6).

Tableau 4.1: Nombre de tests significatifs au niveau de confiance 5% (6 maximum)

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	--						
SAB	2	--					
LIM	2	6	--				
ARG	2	6	3	--			
MVSEC	2	1	1	2	--		
PORO	3	1	1	1	4	--	
C-ORG	1	4	2	3	2	0	--

Tableau 4.2: Nombre de tests significatifs au niveau de confiance 1% (6 maximum)

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	--						
SAB	2	--					
LIM	2	6	--				
ARG	2	6	2	--			
MVSEC	2	0	0	1	--		--
PORO	1	1	0	1	3	--	
C-ORG	1	3	2	3	1	0	--

L'analyse de ces tableaux permet d'identifier la possibilité d'établir des relations générales entre le contenu en sable (SAB) d'une part avec les contenus en limon (LIM) et en argile (ARG). Pour établir des relations acceptables les coefficients de corrélation calculés sont comparés entre eux. Les données sont ensuite regroupées (horizons A,B et C) pour chaque site et les coefficients de corrélation sont à nouveau calculés pour les trois propriétés retenues. Le tableau 4.3 présente les résultats obtenus. Les corrélations calculées entre les trois paramètres de texture (SAB, LIM et ARG) sont forcées par la méthode employée pour leur détermination; le total granulométrique étant toujours constant. Cependant, en reliant seulement deux de ces paramètres de texture, la valeur de la masse volumique sèche pourra être déterminée dans des abaques.

Tableau 4.3: Corrélation par rangs de Kendall % Sable - vs- % Limon et % Argile

	HORIZON	CORRELATION DE KENDALL	
		SAB-vs-LIM	SAB-vs-ARG
SAINT-AUGUSTIN	A	-.5387 (25)	-.5135 (25)
	B	-.5394 (25)	-.7692 (25)
	C	-.7151 (24)	-.4973 (24)
	A,B & C	-.7208 (74)	-.6971 (74)
L'ASSOMPTION	A	-.5094 (25)	-.6735 (25)
	B	-.8591 (25)	-.9146 (25)
	C	-.8593 (25)	-.7500 (25)
	A,B & C	-.7747 (67)	-.8112 (67)
SAINT-AUGUSTIN & L'ASSOMPTION	A,B & C	-.8004 (141)	-.7937 (141)

coefficient " r_K " / (taille de l'échantillon)

Les corrélations impliquant les regroupements des valeurs des trois horizons pour chaque site, ainsi que celle impliquant toutes les valeurs mesurées sur les deux sites sont significatives au niveau de confiance 1%. Deux droites de régression linéaire sont calculées entre le contenu en sable et le contenu en limon et, entre le contenu en sable et le contenu en argile. Ces deux droites de régression témoignent du même phénomène, c'est pourquoi une seule est retenue. Les droites de régression calculées avec l'ensemble des données (141) et un intervalle de confiance de 95%, sont présentées aux figures 4.1 et 4.2, ci-après.

FIG. 4.1: Regression %LIMON = f (%SABLE)
 $\%LIMON = 54.56 - [0.558 * \%SABLE]$

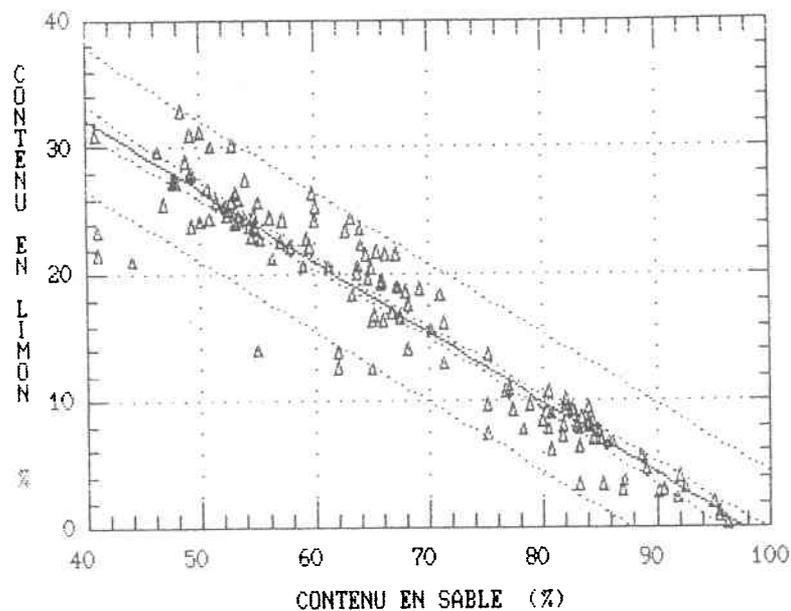
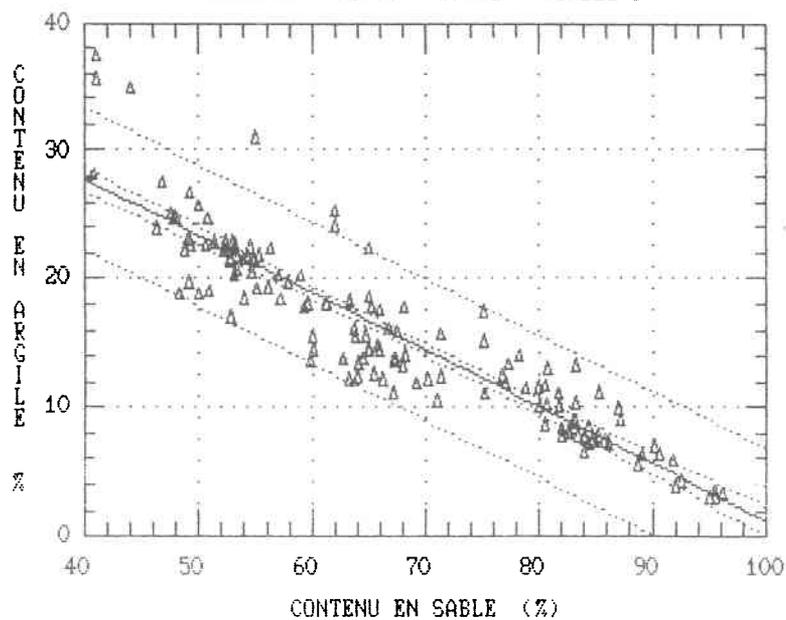
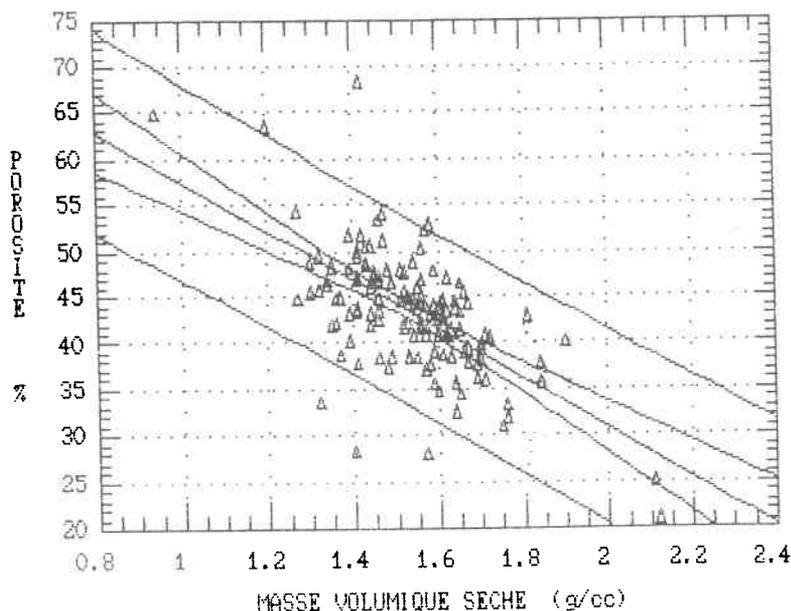


FIG. 4.2: Regression %ARGILE = f (%SABLE)
 $\%ARGILE = 45.44 - [0.442 * \%SABLE]$



Par ailleurs, même si l'analyse de corrélation des propriétés physiques ne fait pas ressortir d'autres relations significatives que celles impliquant les contenus en sable, en limon et en argile; il serait intéressant de considérer certaines relations théoriques dans le modèle hybride. Il est généralement admis dans la littérature que les paramètres de texture (sable, limon, argile) sont reliés à la conductivité hydraulique, à la porosité et à la masse volumique du sol. Après détermination des proportions de sable et d'argile (avec la régression de la figure 4.2), des abaques pourront permettre de sélectionner les valeurs de la conductivité hydraulique et de la masse volumique sèche correspondantes. La porosité peut être déterminée grâce à une régression avec la masse volumique sèche, calculée avec les données réelles mesurées dans les six horizons de sol. Cette dernière régression, présentée à la figure 4.3, est moins représentative que les deux précédentes (test de signification 1% dans trois des six horizons de sol; tableau 4.2). Des précisions sur la méthode employée pour reproduire la variabilité spatiale des paramètres interdépendants, dans la version hybride du modèle, sont fournies dans la prochaine section.

FIG. 4.3: Regression POROSITE = f(MVSEC)
 POROSITE (%) = 84.2 - [26.7 * MVSEC]



5. UTILISATION DU MODELE "VULPEST"

5.1 Présentation

La démarche stochastique qui introduit la variabilité des paramètres pour la simulation du transport d'un contaminant, est réalisable par une approche de type Monte-Carlo. Cette approche consiste à effectuer un nombre suffisant de simulations pour chacune desquelles les valeurs des paramètres sont fixées au moyen d'un tirage aléatoire. Ces tirages sont effectués sur les distributions théoriques des valeurs des paramètres.

Le modèle "Vulpest" permet l'utilisation de plusieurs types de distributions. Cinq lois statistiques peuvent être représentées: discrète, uniforme, normale, lognormale ou bêta. La première étape de tirage aléatoire d'une valeur sur une distribution donnée consiste à générer, dans une distribution de densité équiprobable, une variable aléatoire comprise entre 0 et 1. La seconde étape consiste à calculer, dans la fonction de densité de probabilité inverse, la valeur du paramètre correspondante à la probabilité générée. Cette opération de sélection est pratiquée sur chaque paramètre pour chaque simulation.

Les données d'entrée du modèle, représentées par leur distribution, sont regroupées en quatre (4) catégories qui comprennent les paramètres du climat, du sol, de la culture et du pesticide.

Les résultats des simulations (concentrations maximales, concentrations moyennes annuelles, masses cumulées) sont classés par ordre croissant et traités statistiquement. Les probabilités de dépassement sont présentées sous forme de graphiques et de tableaux. Des histogrammes de fréquence sont également disponibles. Enfin est fournie, une courbe de fuite stochastique représentant la distribution temporelle des concentrations moyennes parvenant à la nappe.

5.2 Paramètres d'entrée

Le contenu des fichiers des paramètres d'entrées est présenté à l'annexe E. Ces caractéristiques sont valables pour le modèle "Vulpest" original et pour la version hybride à l'exception des données relatives aux propriétés des sols qui sont modifiées dans le modèle hybride. Les modifications apportées dans le cas du modèle hybride sont présentées au point 5.4.

5.2.1 Fichier climat

Ce fichier comprend quatre (4) variables de type ponctuel. Ces variables comprennent chacune 12 moyennes mensuelles représentant les précipitations de pluie, les précipitations de neige, l'évapotranspiration et les températures.

5.2.2 Fichier culture

Plus d'une culture peut être considéré et pour chacune d'elles, trois variables sont définies. Les deux premières variables sont des valeurs ponctuelles représentant les jours d'émergence et de maturité de la culture considérée. La troisième variable s'exprime par l'un des cinq (5) types de distribution disponibles et représente le besoin en eau de la culture à maturité. L'ordre de rotation des cultures peut être déterminé.

5.2.3 Fichier pesticide

Ce fichier se divise en trois parties: les caractéristiques du pesticide, les caractéristiques générales de l'application et les caractéristiques d'une application.

Les trois variables reliées aux caractéristiques du pesticide s'expriment chacune par un des cinq (5) types de distribution proposés. Ces trois variables représentent la solubilité du pesticide, son coefficient de partition et sa dégradabilité.

Les caractéristiques générales de l'application sont données par deux variables ponctuelles: le nombre d'années d'application et le nombre d'applications par année.

Les caractéristiques d'une application sont données par trois variables. Les deux premières sont le taux ainsi que la profondeur d'application du pesticide; elles sont décrites chacune par l'un des cinq (5) types de distribution proposés. La troisième variable, de type ponctuel, représente le jour d'application du pesticide.

5.2.4 Fichier sols

Ce fichier se divise en deux parties: les caractéristiques générales du sol et les caractéristiques de chacun des horizons de sol.

Les caractéristiques générales du sol sont représentées par six (6) variables dont cinq (5) utilisent chacune un des types de distribution disponibles. Les cinq (5) variables représentées par des distributions sont la profondeur de la nappe, l'épaisseur du sol pédologique, la conductivité hydraulique ainsi que la porosité du substratum, et la pente du terrain. La sixième variable est une valeur ponctuelle indiquant le nombre d'horizons considéré.

Les caractéristiques de chaque horizon de sol sont des variables représentées chacune par un des types de distribution proposés. Les huit (8) variables sont les suivantes:

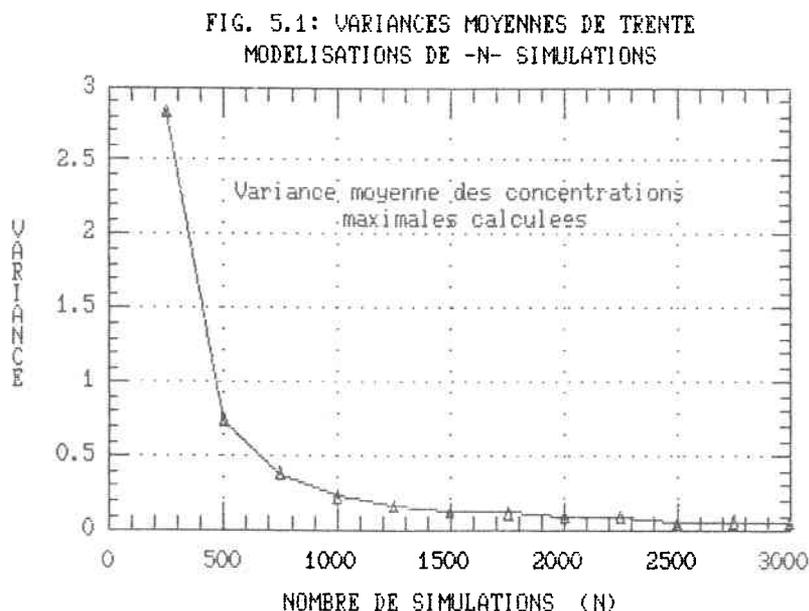
- 1- l'épaisseur de l'horizon
- 2- la conductivité hydraulique
- 3- le pourcentage de sable
- 4- le pourcentage de limon
- 5- le pourcentage d'argile
- 6- le pourcentage de carbone organique
- 7- la porosité
- 8- la densité apparente sèche

5.3 Nombre de simulations requises

Le processus aléatoire de sélection des différents paramètres dans leur distribution propre sera apte à reproduire la variabilité spatiale lorsqu'un nombre suffisant de simulations sera réalisé.

Afin de connaître le nombre minimal nécessaire de simulations, des essais sont effectués. Pour cela, douze sets de simulations sont réalisés. Pour chaque set, trente modélisations de "N" simulations Monte-Carlo sont effectuées; "N" varie de 250 à 3000 par incrément de 250. La variance moyenne des trente modélisations est calculée pour chacun des douze sets.

L'évolution de la variance moyenne des résultats de concentrations maximales en fonction du nombre de simulations est présentée à la figure 5.1. La variance observée pour 1000 simulations n'est que de 6% supérieure à celle correspondant à 3000 simulations. La valeur de 1000 simulations est donc jugée acceptable pour la reproduction de la variabilité spatiale et elle est utilisée pour les modélisations dans la présente étude.



5.4 Modèle hybride considérant les corrélations

Le chapitre quatre (4) portant sur les corrélations et sur les régressions a montré que les paramètres de texture (contenus en sable, en limon et en argile) sont bien corrélés dans l'ensemble des horizons de sol étudiés. De plus, il a été décidé de déterminer la conductivité hydraulique et la masse volumique de sol directement à partir des paramètres de texture. Finalement, une régression calculée avec l'ensemble des données disponibles permet de déterminer la porosité avec la valeur de la masse volumique préalablement sélectionnée.

5.4.1 Introduction d'une variable aléatoire dans les régressions

L'équation générale de la régression comporte un terme d'incertitude généralement négligé. Cette équation générale se définit comme suit:

$$(y - y_{moy}) = \left[\frac{\sigma_y}{\sigma_x} r (x - x_{moy}) \right] + \left[\sigma_y \sqrt{(1 - r^2)} \Sigma \right]$$

Σ est une variable aléatoire comprise entre 0 et 1. Le calcul du terme à droite de l'équation équivaut à tirer une valeur dans une distribution normale ayant pour moyenne le point sur la droite de régression. Cette modification est apportée dans le modèle hybride pour la sélection du contenu en argile, à partir du contenu en sable ainsi que pour la sélection de la porosité, à partir de la masse volumique. Les résultats de cette modification sont présentés au tableau 5.1, ci-après.

Tableau 5.1: Caractéristiques des régressions

REGRESSION	CALCUL DE LA MOYENNE	ECART TYPE
%ARGILE = FCT (%SABLE)	(-.442 * %SAB)+45.44	1.104
%POROSITE = FCT (MVSEC)	(-26.66*MVSEC)+84.19	4.394

Le contenu en sable est tiré aléatoirement dans sa distribution et il est utilisé pour déterminer le contenu en argile. Comme expliqué dans la section 4.2, la régression servant à déterminer le contenu en limon, à partir du contenu en sable, n'est pas incluse dans le modèle hybride. Sa valeur est déterminée directement d'après les valeurs des contenus en sable et en argile.

Après avoir sélectionné, dans un abaque, la masse volumique sèche par les contenus en sable et en argile, la porosité est déterminé par régression.

5.4.2 Détermination de la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est sélectionnée directement dans une table ayant pour clé les contenus en sable et en argile. Cette table a été construite en combinant le tableau des classes texturales des sols (U.S. Soil Conservation Service) avec les tableaux des conductivités hydrauliques des sols d'après Freeze et Cherry (1979) et d'après Bear (1972). Ces trois sources sont présentés aux figures 5.2, 5.3 et 5.4.

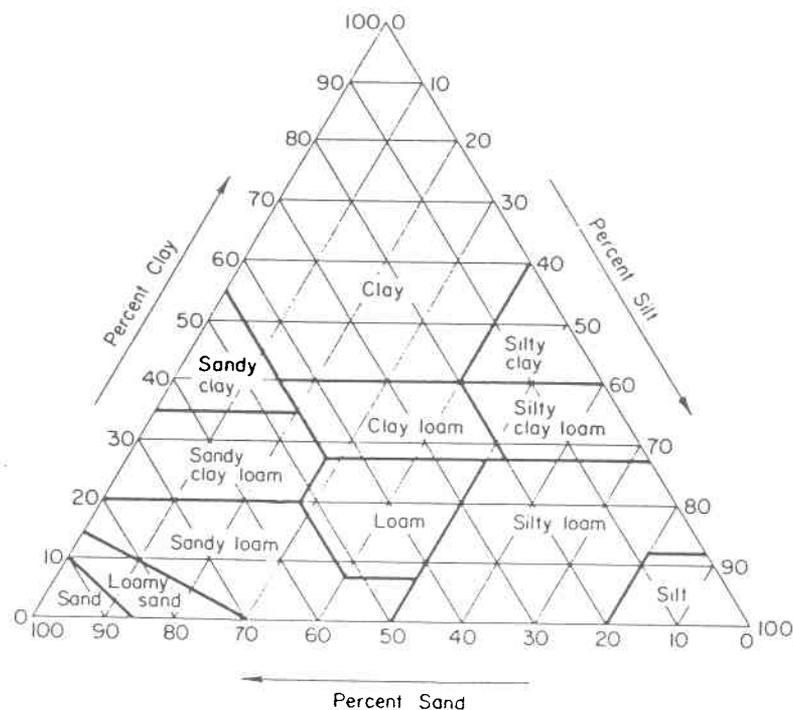


Figure 5.2 Classes texturales des sols

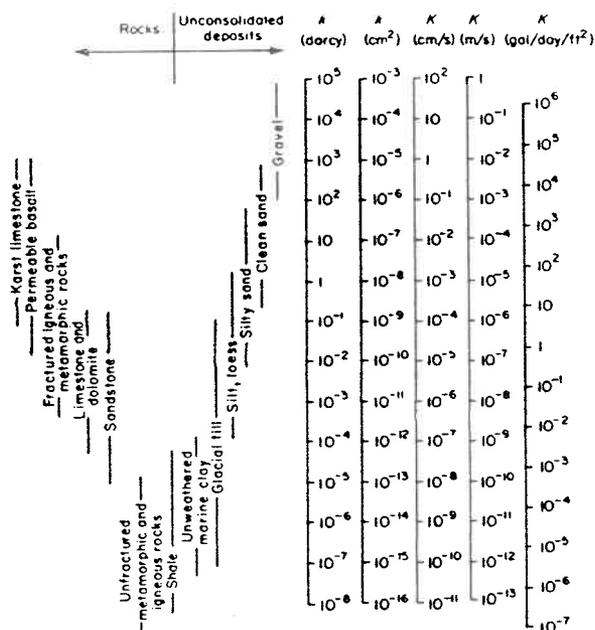


Figure 5.3 Conductivités hydrauliques pour différents sols (Freeze et Cherry, 1979)

$-\log_{10} K(\text{cm}^2/\text{s})$	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Permeability	Pervious			Semipervious						Impervious					
Aquifer	Good			Poor						None					
Soils	Clean gravel	Clean sand or sand and gravel			Very fine sand, silt, loess, loam, solonetz						Unweathered clay				
				Peat		Stratified clay									
Rocks				Oil rocks			Sandstone			Good limestone, dolomite		Breccia, granite			
$-\log_{10} k(\text{cm}^2)$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
$\log_{10} k(\text{md})$	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	

Figure 5.4 Conductivités hydrauliques pour différents sols (Bear, 1972)

5.4.3 Détermination de la masse volumique sèche

La masse volumique sèche est évaluée à partir de la densité apparente minérale et du pourcentage de matière organique par la formule suivante:

$$MVS = \frac{100.0}{\frac{\%MO}{DAMO} + \frac{100.0 - \%MO}{DAM}}$$

MVS = masse volumique sèche

DAM = densité apparente minérale

DAMO = densité apparente de la matière organique. (0.224)

%MO = pourcentage de matière organique

La densité apparente minérale est sélectionnée directement dans une table ayant pour clé les contenus en sable et en argile. Cet abaque a été établi par le Département de l'Agriculture des Etats-Unis (Carsel et al., 1984) et il est présenté à la figure 5.5.

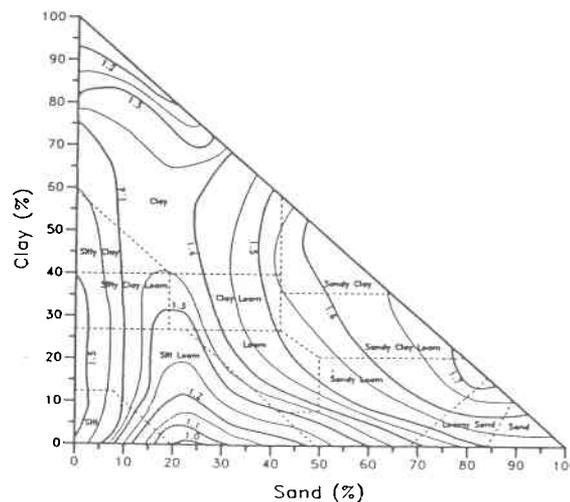


Figure 5.5 Densité minérale apparente

5.4.4 Ordre des modifications du modèle hybride

Les modifications apportées sur le modèle "Vulpest" s'opèrent comme suit:

1. détermination du contenu en sable (inchangé)
2. détermination du contenu en argile par régression avec le contenu en sable
3. détermination du contenu en limon en complétant le total granulométrique (100 - %Sable - %Argile)
4. détermination de la conductivité hydraulique et de la masse volumique sèche dans une table par les contenus en sable et en argile
5. détermination de la porosité par régression avec la masse volumique sèche

Ces modifications sont effectives sur tous les horizons de sol considérés.

5.5 Scénarios de comparaison entre les différents types de modélisations

5.5.1 Etape 1: Vulpest original avec les données d'entrée initiales

Le modèle Vulpest, dans sa version originale, est utilisé pour modéliser le transport de différents pesticides sur les deux (2) sites choisis. Les données d'entrée du modèle sont celles qui ont été mesurées en laboratoire sur des échantillons représentatifs de chaque horizon de sol impliqué. Le transport de neuf pesticides différents est modélisé: simazine, atrazine, linuron, picloram, carbofurane, dicamba, aldicarbe, isocarbamide et diméthoate.

Les caractéristiques des données d'entrées utilisées pour cette étape sont présentées à l'annexe E, intitulée: données d'entrées du modèle Vulpest non-modifié.

5.5.2 Etape 2: Vulpest hybride avec les données d'entrée initiales et corrélations

La version hybride du modèle Vulpest est utilisée. Les données d'entrées sont les mêmes, sauf pour les modifications présentées précédemment au point 5.4. Le transport des neufs pesticides susmentionnés est modélisé pour chacun des sites.

5.5.3 Etape 3: Vulpest original avec des données d'entrée représentatives de l'étape 2

Les étapes 1 et 2 ne peuvent servir à mesurer l'effet de la considération des régressions dans la modélisation. Lors des simulations réalisées dans l'étape 2, les paramètres sélectionnés avec les régressions, dans chacun des horizons, ne sont probablement pas distribués de la même façon que lors de l'étape 1. Pour comparer le processus de sélection aléatoire des paramètres (étape 1) avec un processus de sélection plus déterministe (étape 2), les distributions statistiques des paramètres impliqués doivent être à peu près équivalentes. Pour ce faire, la sélection des paramètres du modèle hybride est enregistrée pour tous les horizons lors des 1000 simulations. Les distributions statistiques sont reconstituées pour les paramètres rendus dépendants. Ces distributions sont présentées aux tableaux 5.2 (pour Saint-Augustin) et 5.3 (pour l'Assomption). Les distributions nouvellement établies remplacent celles qui proviennent des analyses de laboratoire et la réalisation de cette étape de modélisation doit permettre de mesurer l'effet de l'interdépendance des paramètres considérés par comparaison avec les résultats obtenus lors de l'étape 2.

La comparaison des tableaux (3.1-vs-5.2 et 3.2-vs-5.3) révèle que des quatre paramètres dont les distributions statistiques peuvent changer, seule celle de la conductivité hydraulique l'est d'une façon notable. De plus, l'impact de l'utilisation d'un abaque pour déterminer la conductivité hydraulique est opposé dans les deux sites considérés: augmentation pour le site de l'Assomption et diminution pour le site de Saint-Augustin. Cela montre que l'utilisation d'un abaque général pour déterminer la conductivité hydraulique est moins précis que de sélectionner la valeur dans la distribution du paramètre propre à chaque site.

Tableau 5.2: Modifications de certaines distributions statistiques pour le site de Saint-Augustin

PARAMETRE	HORIZON "A"	HORIZON "B"	HORIZON "C"
K (m/sec)	LOG M:4.50E-8 ET:1.07E-7	UNIF BI:1.0E-8 BS:1.0E-6	UNIF BI:7.5E-7 BS:1.0E-6
% ARGILE	NORM M:21.9 ET:1.2	NORM M:21.7 ET:3.57	NORM M:16.2 ET:2.02
POROSITE(%)	NORM M:48.2 ET:3.9	NORM M:47.1 ET:4.1	NORM M:45.1 ET:4.0
DENSITE APP. SECHE (g/cc)	NORM M:1.35 ET:.03	NORM M:1.39 ET:.046	NORM M:1.47 ET:0.03

Tableau 5.3: Modifications de certaines distributions statistiques pour le site de l'Assomption

PARAMETRE	HORIZON "A"	HORIZON "B"	HORIZON "C"
K (m/sec)	UNIF BI:.1E-5 BS:.1E-4	LOG M: .61E-4 ET: .58E-2	LOG M:.12E-4 ET:.49E-4
% ARGILE	NORM M: 9.4 ET:1.6	UNIF BI: 2.5 BS: 27.5	UNIF BI: 4.0 BS: 20.0
POROSITE(%)	NORM M:46.2 ET:3.9	NORM M:44.6 ET:4.1	NORM M:43.8 ET:4.0
DENSITE APP. SECHE (g/cc)	NORM M:1.43 ET:.03	NORM M:1.49 ET:.041	NORM M:1.52 ET:0.03

5.6 Résultats des modélisations

Les résultats des modélisations pour les neuf (9) pesticides choisis sont présentés à l'annexe F. Les concentrations maximales, annuelles et les masses cumulées de pesticide atteignant la nappe phréatique sont présentées pour trois probabilités de dépassement (0.1, 0.5 et 0.9). Le temps d'apparition du pesticide au niveau de la zone saturée depuis son application en surface est calculé pour chaque pesticide.

Ces informations sont données pour chacune des trois étapes présentées au point 5.5 et cela pour chacun des deux sites étudiés.

6. DISCUSSION

6.1 Analyse des résultats

En analysant les tableaux présentés à l'annexe F, il apparaît que les résultats des modélisations de l'étape 1 (modèle original avec les données intégrales) ne se comparent en rien avec les résultats des modélisations des étapes étape 2 et 3. Cela n'est pas surprenant car, lors de la modification du modèle, certaines corrélations ont été basées sur des hypothèses théoriques qui n'étaient pas apparentes sur les données obtenues sur les sites. De ce fait, les corrélations générant des données d'entrée différentes pour le modèle hybride, les résultats des modélisations ne sont pas représentatifs pour des sites réels (étape 2). La présente étude visant à déterminer l'effet de l'interdépendance des propriétés physiques dans la modélisation stochastique, le modèle original (étape 3) doit utiliser les mêmes données d'entrée que celles générées par le modèle hybride. Les résultats de l'étape 1 ne sont donc pas utilisés dans cette discussion.

En ce qui concerne les étapes 2 et 3, les résultats des modélisations où le pesticide n'atteint pas la nappe phréatique sont éliminés. Les résultats correspondant à la probabilité de dépassement de 50% sont comparables et très faibles pour tous les pesticides. Les résultats utilisés pour le reste de la discussion sont donc ceux correspondant à la probabilité de dépassement 10% où une différence notable est remarquée entre les étapes 2 et 3.

6.2 Effet de l'interdépendance de certains paramètres sur la quantité de pesticide migrant vers la zone saturée

Le croisement de certains paramètres physiques affecte la rapidité de l'écoulement dans le sol, et les pesticides qui sont les plus solubles et les plus biodégradables sont les plus influencés par cette modification. Le tableau suivant présente les caractéristiques chimiques des pesticides utilisées; le coefficient de partition

n'est pas considéré du fait de sa relation directe, admise dans la littérature, avec la solubilité.

Tableau 6.1: Résumé des caractéristiques chimiques des pesticides modélisés

PESTICIDE	SOLUBILITE (mg/l)	DEGRADABILITE (/jour)
Simazine	5	0.031
Atrazine	33	0.01
Linuron	75	0.016
Picloram	430	0.151
Carbofuran	700	0.043
Dicamba	4500	0.108
Aldicarb	6000	0.022
Isocarbamid	13000	0.25
Dimethoate	25000	0.006

6.2.1 Concentrations (ou masses) -vs- solubilité

L'importance de l'interdépendance des propriétés des sols (%sable, %argile, conductivité hydraulique, masse volumique sèche et porosité) est reliée avec l'écoulement de l'eau dans le sol. Dans les modélisations réalisées, les pesticides les plus solubles devraient donc être ceux qui atteignent la zone saturée en plus grande quantité. Egalement, la différence entre les résultats du modèle hybride (étape 2) et du modèle original (étape 3) devrait être plus grande pour les pesticides les plus solubles.

En conformité avec les hypothèses précédentes, les figures 6.1 à 6.6 mettent en relief les différences entre les résultats des étapes 2 et 3.

FIGURE 6.1

VULPEST: versions originale et hybride
Concentrations maximales: Saint-Augustin

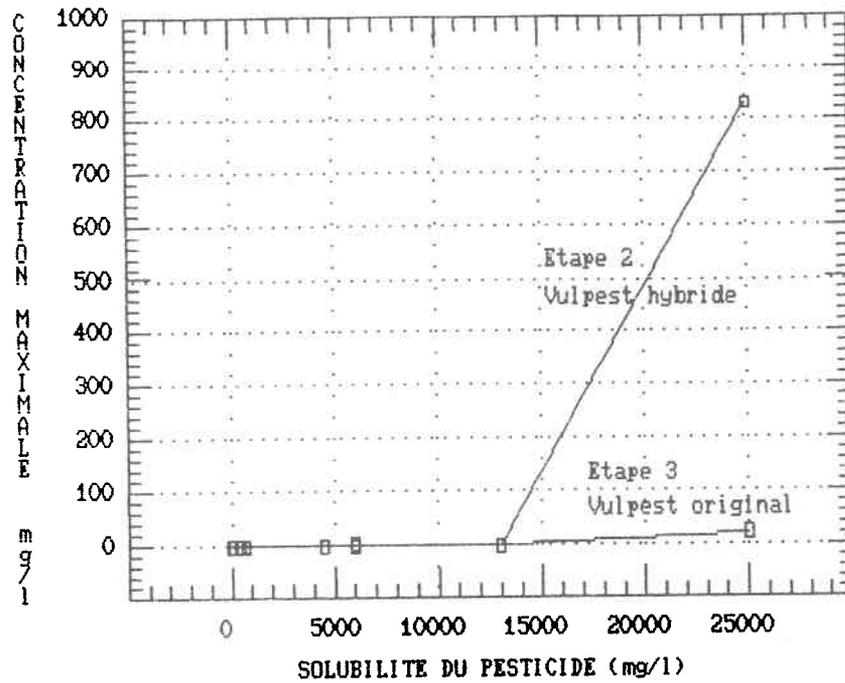


FIGURE 6.2

VULPEST: versions originale et hybride
Concentrations annuelles: Saint-Augustin

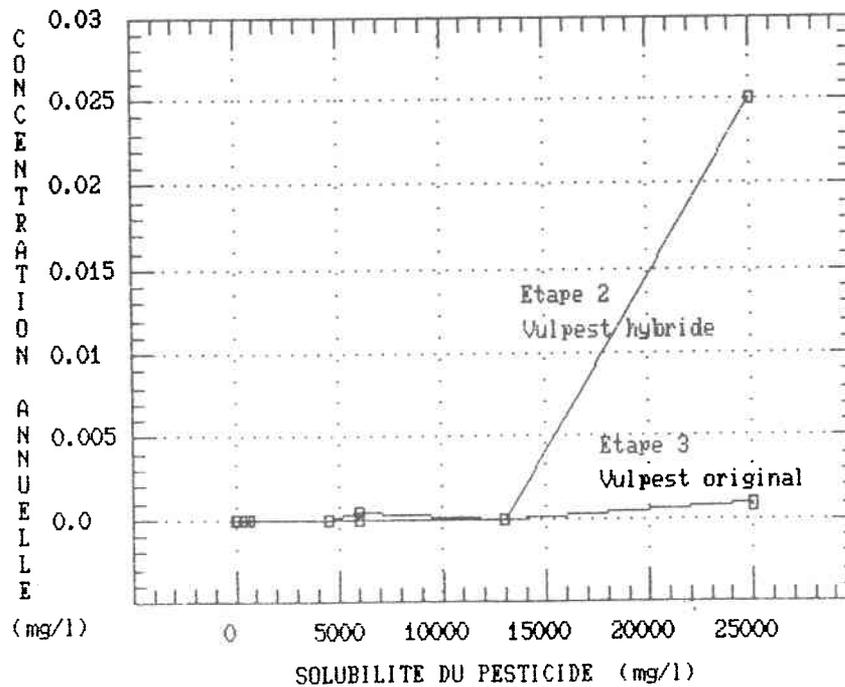


FIGURE 6.3

VULPEST: versions originale et hybride
 Masses cumulees: Saint-Augustin

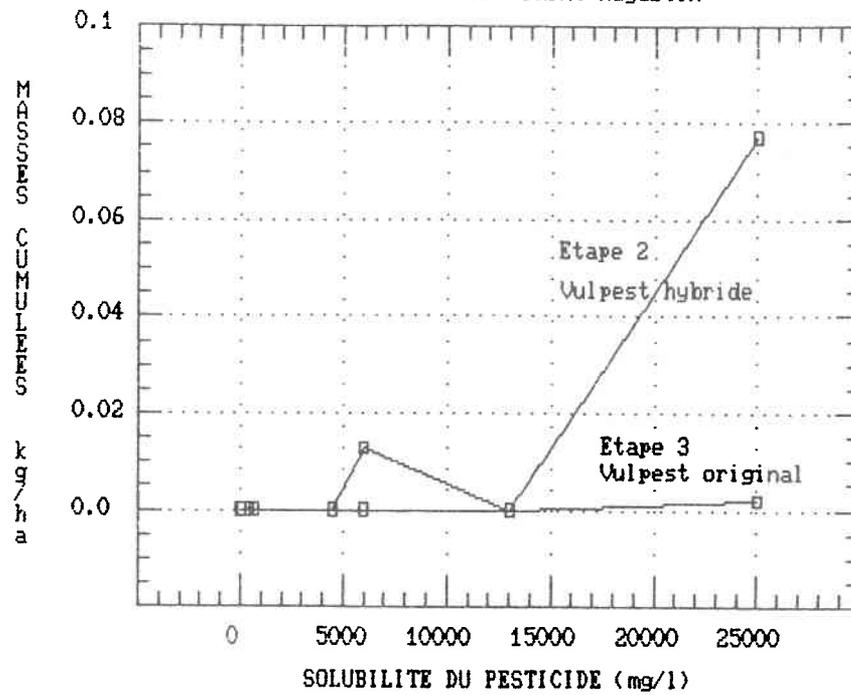


FIGURE 6.4

VULPEST: versions originale et hybride
 Concentrations maximales: L'Assomption

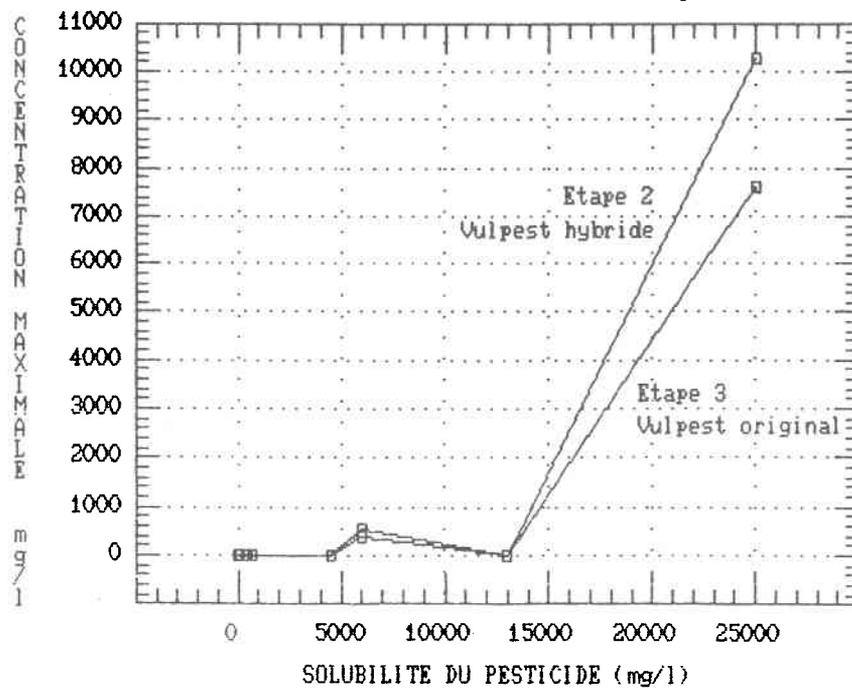


FIGURE 6.5

VULPEST: versions originale et hybride
Concentrations annuelles: L'Assomption

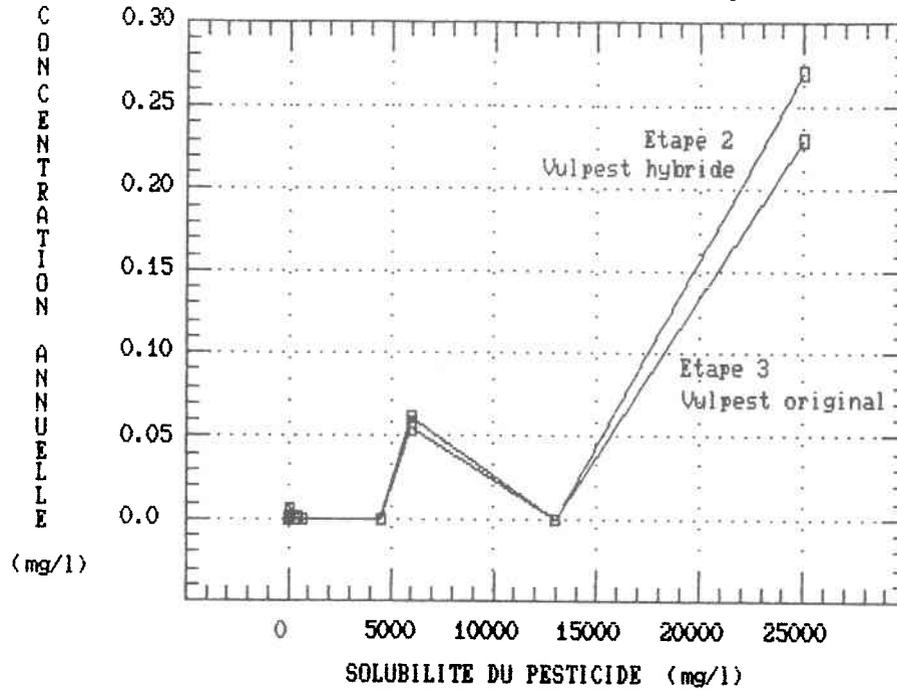
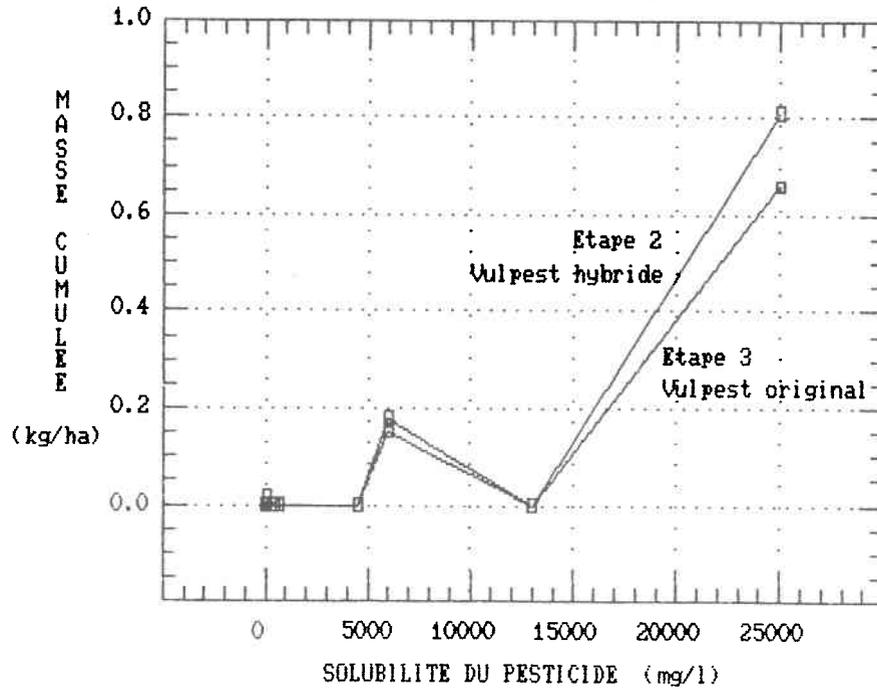


FIGURE 6.6

VULPEST: versions originale et hybride
Masses cumulees: L'Assomption



En général, très peu de différences entre les deux types de simulations sont apparentes pour huit (8) des neuf (9) pesticides utilisés. Les différences sont observables pour les simulations du transport du pesticide ayant la solubilité la plus élevée, soit 25000 mg/l (diméthoate).

La différence des résultats des deux types de modélisations est beaucoup plus faible sur le site de l'Assomption que sur celui de Saint-Augustin même pour le diméthoate. Cela peut s'expliquer par un degré d'homogénéité différent des sites.

Les résultats du modèle hybride, considérant des corrélations, sont donc différents du modèle stochastique pur pour des situations de faibles probabilités de dépassement (ici 10%), pour des solubilités de pesticide élevées et cela d'autant plus que la variabilité spatiale des propriétés physiques du sol sera grande.

6.2.2 Temps d'arrivée -vs- solubilité

Pour les modèles hybride et original, une solubilité élevée de pesticide doit entraîner un temps d'arrivée plus court à la nappe phréatique. Les figures 6.7 et 6.8 montrent que ce phénomène est marqué pour les solubilités de pesticide supérieures à 1000 mg/l. De plus, les différences entre les deux types de modélisations dans le calcul du temps d'arrivée, sont apparentes pour des solubilités inférieures à 1000 mg/l.

A Saint-Augustin (fig. 6.7), les temps d'arrivée sont tous supérieurs à 100 semaines. Le modèle hybride donne un temps d'arrivée inférieur au modèle original. Pour les valeurs de solubilités inférieures à 1000 mg/l, le temps d'arrivée calculé avec le modèle hybride est jusqu'à 300 semaines plus court que celui calculé avec le modèle original qui donne 600 semaines. Cependant, ces valeurs élevées de temps d'arrivée laissent planer un doute sur leurs fiabilités.

A l'Assomption (fig. 6.8), les calculs des temps d'arrivée donnent des valeurs comprises entre 35 et 80 semaines. Les tendances observées sont les mêmes qu'à Saint-Augustin. Pour les valeurs de solubilités inférieures à 1000 mg/l, le temps d'arrivée calculé avec le modèle hybride est jusqu'à 20 semaines plus court que celui calculé avec le modèle original qui donne 80 semaines.

FIGURE 6.7

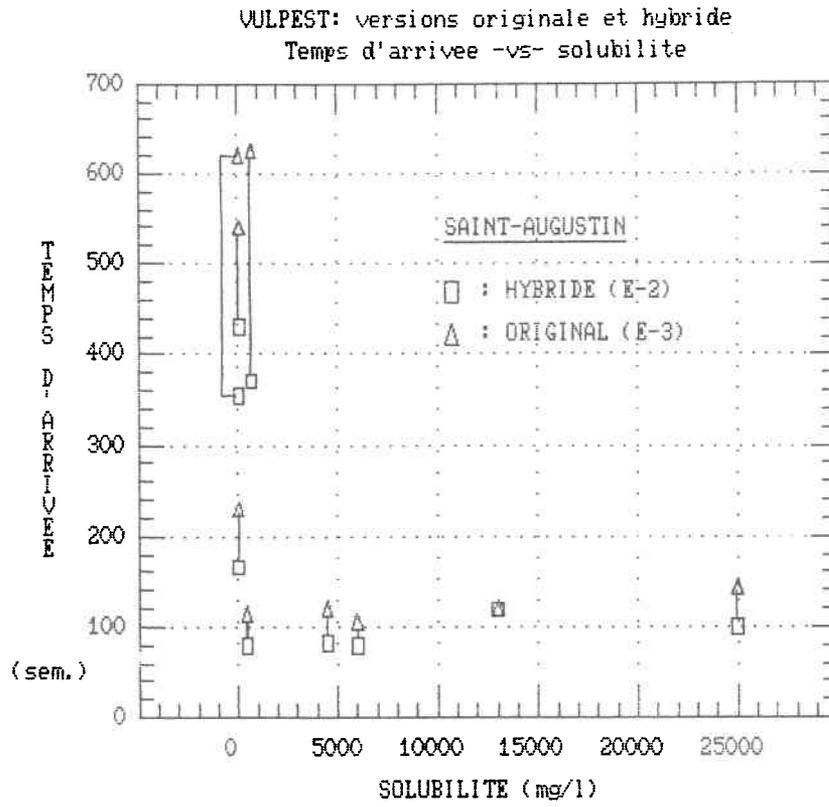
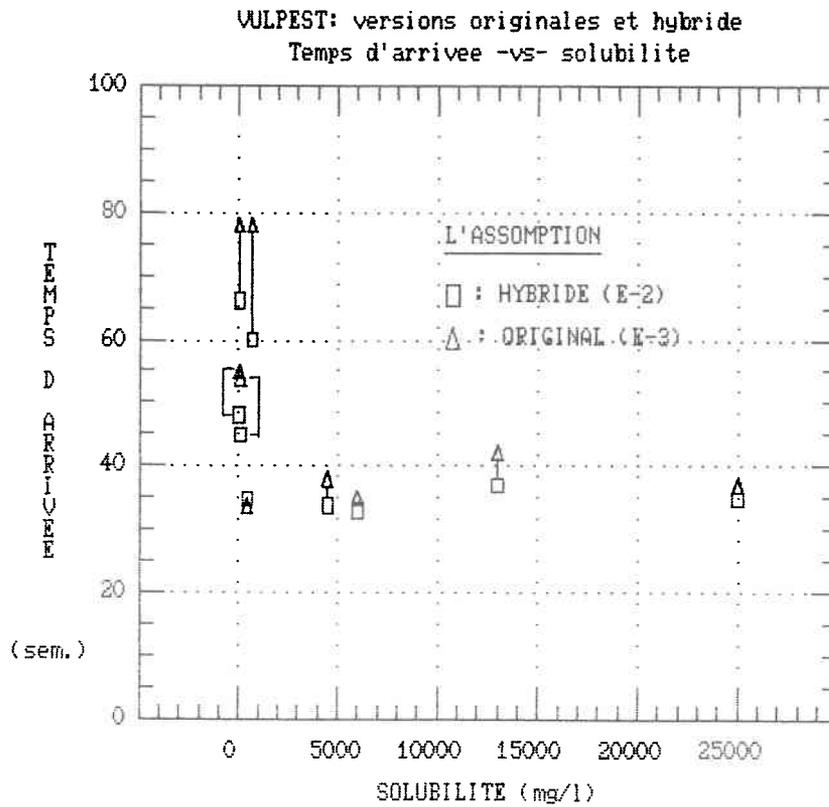


FIGURE 6.8



6.2.3 Concentrations (ou masses) -vs- dégradabilité

Pour les modèles hybride et original, un coefficient de dégradabilité faible doit entraîner une plus grande quantité de pesticide au niveau de la nappe phréatique. C'est ce que les figures 6.9 et 6.10 révèlent mais, le phénomène ne semble marqué que pour le pesticide ayant la dégradabilité la plus faible soit le diméthoate (0.006 /jour). Il est à remarquer que le diméthoate possède aussi la solubilité la plus élevée (25000 mg/l), ce qui lui confère un temps d'arrivée court donc peu de temps pour se dégrader.

Les concentrations calculées pour les autres pesticides sont à toutes fins pratiques négligeables et il est très possible qu'ils aient le temps de se dégrader à cause de leur coefficient de dégradabilité plus élevé et de leur temps d'arrivée également plus élevée.

Pour les deux sites et dans le cas du diméthoate, le modèle hybride donne une concentration supérieure à celle du modèle original. A Saint-Augustin, l'écart entre les deux modèles est énorme et cela appuie le doute sur la fiabilité des résultats évoquée au point 6.2.2. Quant à l'écart faible entre les valeurs des deux modèles pour le site de l'Assomption, il est cohérent avec les temps d'arrivée qui sont du même ordre.

FIGURE 6.9

VULPEST: versions originale et hybride
 Concentration maximale -vs- degradabilite

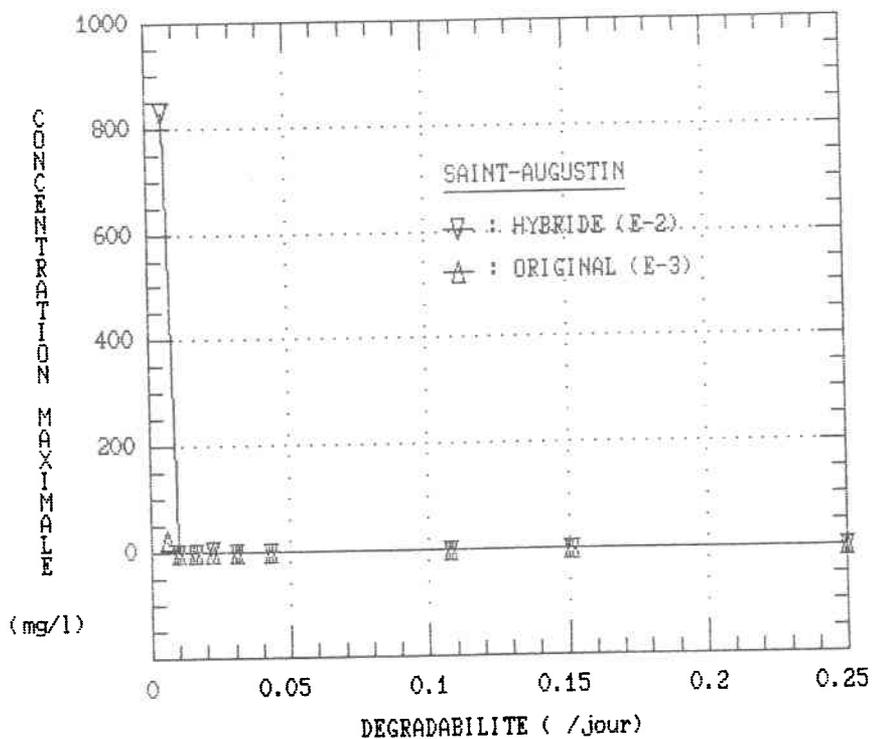
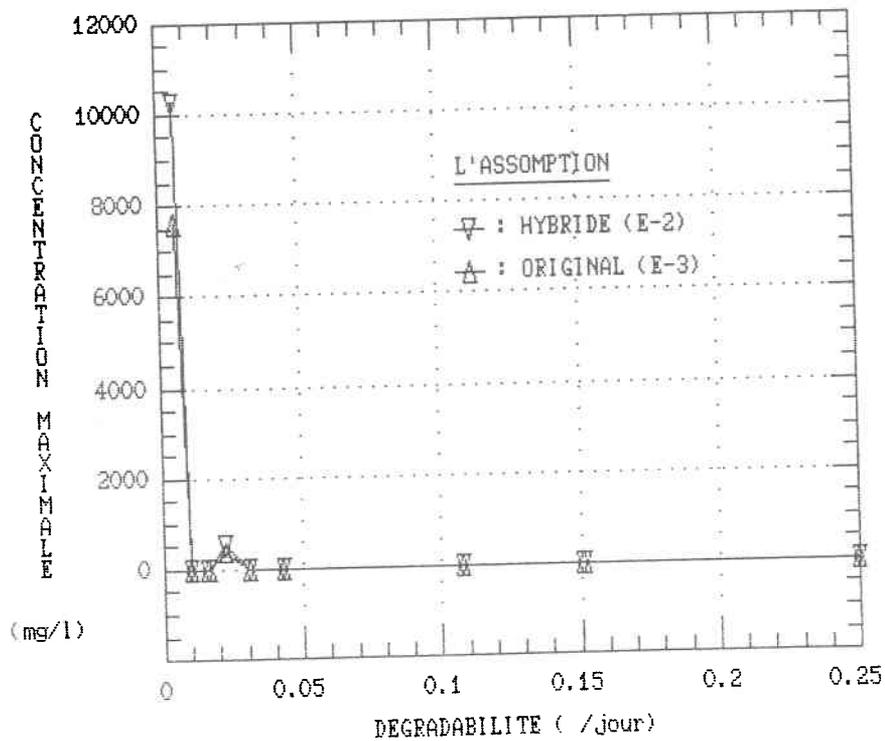


FIGURE 6.10

VULPEST: versions originale et hybride
 Concentration maximale -vs- degradabilite



6.3 Représentation du degré d'homogénéité d'un site

Les différences entre les résultats des deux modèles étant beaucoup plus marquées pour le site de Saint-Augustin que pour celui de L'Assomption où le dépôt de sol semblait plus homogène, il paraît important de quantifier le degré d'homogénéité d'un site.

La méthode utilisée dans cette étude pour établir des corrélations significatives entre différentes propriétés physiques des sols peut servir à mesurer le degré d'homogénéité d'un site. La méthode de corrélation par rang de Kendall est robuste, facile d'utilisation et ne nécessite pas l'emploi de variables normalement distribuées. Une propriété intéressante du coefficient de Kendall est sa convergence rapide vers la loi normale. Il est donc possible d'établir un test de signification du niveau de confiance pour chaque corrélation.

Dans cette étude, il a été observé que plus un site a de corrélations significatives entre ses propriétés physiques, plus il est homogène. Les tableaux 1 à 6 de l'annexe "D" permettent de statuer entre le site de Saint-Augustin et celui de l'Assomption. A Saint-Augustin, neuf (9) corrélations significatives au niveau 1% et une (1) corrélation au niveau 5% furent observées. A l'Assomption, vingt (20) corrélations significatives au niveau 1% et six (6) au niveau 5% furent observées.

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La comparaison des résultats de deux versions du modèle "Vulpest" (une version tenant compte de l'interdépendance de certains paramètres physiques et l'autre pas) a permis d'établir les remarques suivantes.

Aucune différence importante n'apparaît pour les résultats de simulations correspondant à des événements de probabilité de dépassement de 50% et 90%. Les résultats associés à la probabilité de dépassement de 10% diffèrent pour certains pesticides.

Il doit être rappelé que les régressions établies dans le modèle hybride ne sont pas basées que sur des corrélations significatives et que des abaques empiriques furent utilisés. Egalement, des différences dans les résultats des modelisations ne sont apparues que pour des faibles probabilités de dépassement.

Il apparait dans l'étude des deux sites impliqués que la considération du croisement des propriétés physiques influence peu la qualité de la modélisation de l'écoulement vertical d'un pesticide dans les sols.

Par ailleurs, des variations beaucoup plus importantes ont été remarquées dans les résultats de sites ayant des degrés d'homogénéité différents. Les efforts futurs devraient donc s'orienter vers la quantification et la considération de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols, sans trop se soucier de leur interdépendance.

Dans cette étude, les propriétés biochimiques des sols et leurs interdépendances possibles avec les propriétés physiques ne furent pas abordées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bashan, Y. et J. Wolowelsky (1987).

"Soil samplers for quantifying microorganisms", *Soil Science*, 143, 132-138.

Bell, D.F. (1964).

"Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils", *J. Soil Sci.*, 15, 84-92.

Black, C.A. (1965).

"Methods of soil analysis", Part I, *Agronomy*, No. 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisc.

BNQ 2501-170 (1981).

"Sols: Détermination de la teneur en eau", Bureau de Normalisation du Québec, Gouvernement du Québec.

Bowles, J.E. (1970).

"Engineering properties of soils and their measurement", McGraw-Hill, Toronto.

Bresler, E. et G. Dagan (1981).

"Convective and pore scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous fields", *Water Resour. Res.*, 17, 1683-1693.

Bresler, E., G. Dagan, R.J. Wagenet and A. Laufer (1984).

"Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 16-25.

Byers, E. et D.B. Stephens (1983).

"Statistical and stochastic analyses of hydraulic conductivity and particule-size in a fluvial sand", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 1072-1080.

- Carsel, R.F., Smith, C.N., Mulkey, L.A., Dean, J.D et Jowise, P. (1984).
"User's manual for the pesticide root zone model (PRZM)", EPA 600/3-84-109,
Environmental research laboratory-Athens, Georgia, 216 p.
- Carsel, R.F. et R.S. Parrish (1988).
"Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics",
Water Resour. Res., 24, 755-769.
- Cassel, D.K. et A. Bauer (1975).
"Spatial variability in soils below depth of tillage: Bulk density and fifteen
atmosphere percentage", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 39, 247-251.
- Chason, D.B. et D.I. Siegel (1986).
"Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, Lost River
peatland, northern Minnesota", Soil Science, 142, 91-99.
- De Smedt, F., F. Wauters et J. Sevilla (1986).
"Study of tracer movement through unsaturated sand", Geoderma, 38, 223-236.
- El-Kadi, A.I. (1987).
"Variability of infiltration under uncertainty in unsaturated zone parameters",
Journal of hydrology, 90, 61-80.
- Greminger, P.J., Y.K. Sud et D.R. Nielsen (1985).
"Spatial variability of field-measured soil-water characteristics", Soil Sci. Soc. Am.
J., 49, 1075-1082.
- Heard, J.R., E.J. Klavivko et J.V. Mannering (1988).
"Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils
under long-term conservation tillage in Indiana", Soil & Tillage Research, 11, 1-
18.
- Jones, R.L., R.V. Rourke et Hansen, J.L. (1986).
"Effect of application methods on movement and degradation of aldicarb
residues in Maine potato fields", Environ. Toxicol. Chem., 5, 167-173.

Lee, D.M., W.D.Reynolds, D.E. Elrick et B.E. Clothier (1985).

"A comparaison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity", Can. J. Soil Sci., 65, 563-573.

Legendre, L. et Legendre, P. (1979).

"Ecologie numérique. Tome 1: Le traitement multiple des données écologiques", Masson, Paris.

Lyman, W.J., Reehl, W.F. et D.H. Rosenblatt (1982)

"handbook of chemical property estimation methods. Environmental behavior of organic compound.", Mc Graw-Hill Co.

Masch, F.D. et K.J. Denny (1966).

"Grain size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sand", Water Resour. Res., 2, 665-677.

McIntyre, D.S. (1974).

"Methods of soil analysis of irrigated soils", Commonwealth Bureau of Soils, Tech. Communic. No. 54.

McKeague, J.A. (1977).

"Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols", p. 63, Soil Research Institute, Agriculture Canada, Ottawa.

NQ 2501-025 (1987).

"Sols: Analyse granulométrique des sols inorganiques", Bureau de Normalisation du Québec, Gouvernement du Québec.

Rao, P.S.C. et R.J. Wagenet (1985).

"Spatial variability of pesticides in field soils: Methods for data analysis and consequences", Weed Science, 33 (Suppl.2), 18-24.

Reynolds, W.D., et D.E. Elrick (1985).

"In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter", *Soil Science*, 140, 292-302.

Russo, D. et E. Bresler (1981).

"Soil hydraulic properties as stochastic processes: 1. An analysis of field spatial variability", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 682-687.

STSC inc. (1986).

"Statgraphics: User's guide", Statistical Graphics Corporation, Maryland, USA.

Tabatabai, M.A. et J.M. Bremner (1970).

"Use of the Leco automatic 70-second carbon analyzer for total carbon analysis of soils", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 608-610.

Villeneuve, J.P., O. Banton et P. Lafrance (1987a).

"Developpement d'un outil simple et adaptable pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides", *Rapport scientifique INRS-Eau (233a)*, Université du Québec, novembre 1987, 56 p.

Villeneuve, J.P., O. Banton, P. Lafrance, C. Blanchette, S.Deschenes (1987b).

"Vulpest: un outil pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides", *Rapport scientifique INRS-Eau (234)*, Université du Québec, novembre 1987, 88 p.

Wagenet, R.J., R.E. Knighton et E. Bresler (1984).

"Soil chemical and physical effects on spatial variability of hydraulic conductivity", *Soil Science*, 137, 252-262.

Warrick, A.W., G.J. Mullen et D.R. Nielsen (1977).

"Predictions of the soil water flux based upon field-measured soil-water properties", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 14-19.

Williams, R.D., L.R. Ahuja, J.W. Naney, J.D. Ross et B.B. Barnes (1987).

"Spatial trends and variability of soil properties and crop yield in a small watershed", Transactions of the ASAE, 30, 1653-1660.

Wood, L.S., H.D. Scott, D.B. Marx et T.L. Lavy (1987).

"Variability in sorption coefficients of metolachlor on a Captina silt loam", J. Environ. Qual., 16, 251-256.

ANNEXE A

Caractérisation des sites



FIGURE A-1: SAINT-AUGUSTIN

LOCALISATION DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE

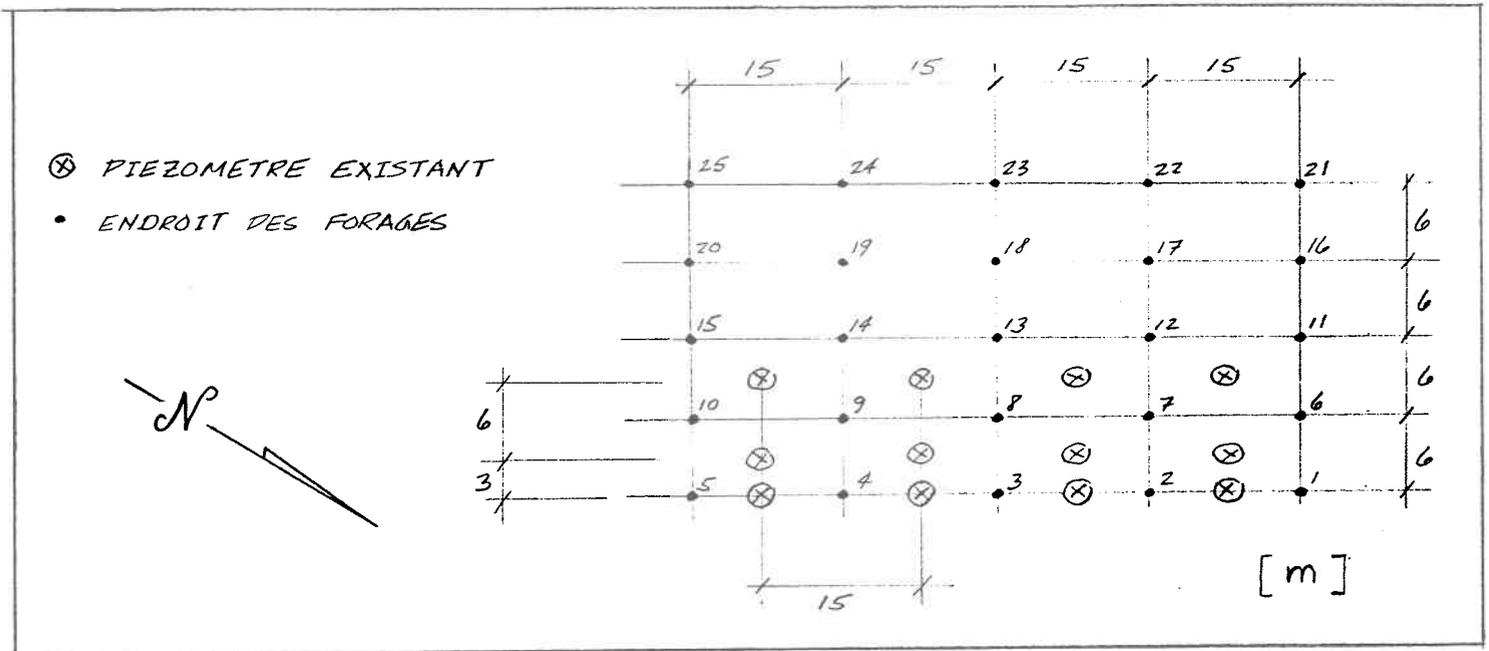


FIGURE A-2: L'ASSOMPTION

LOCALISATION DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE

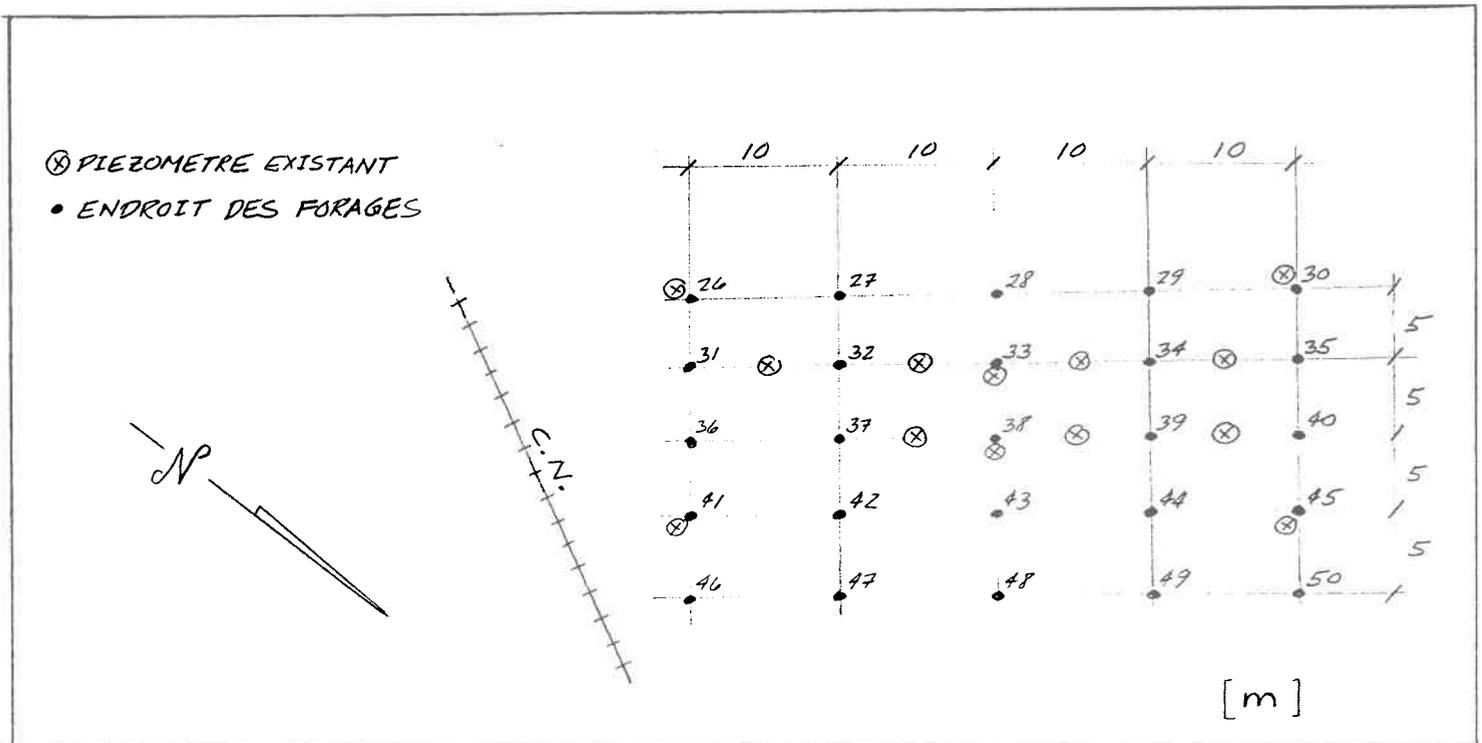


FIGURE A-3: SCHEMA DE L'ECHANTILLONNEUR INTRAMEGA

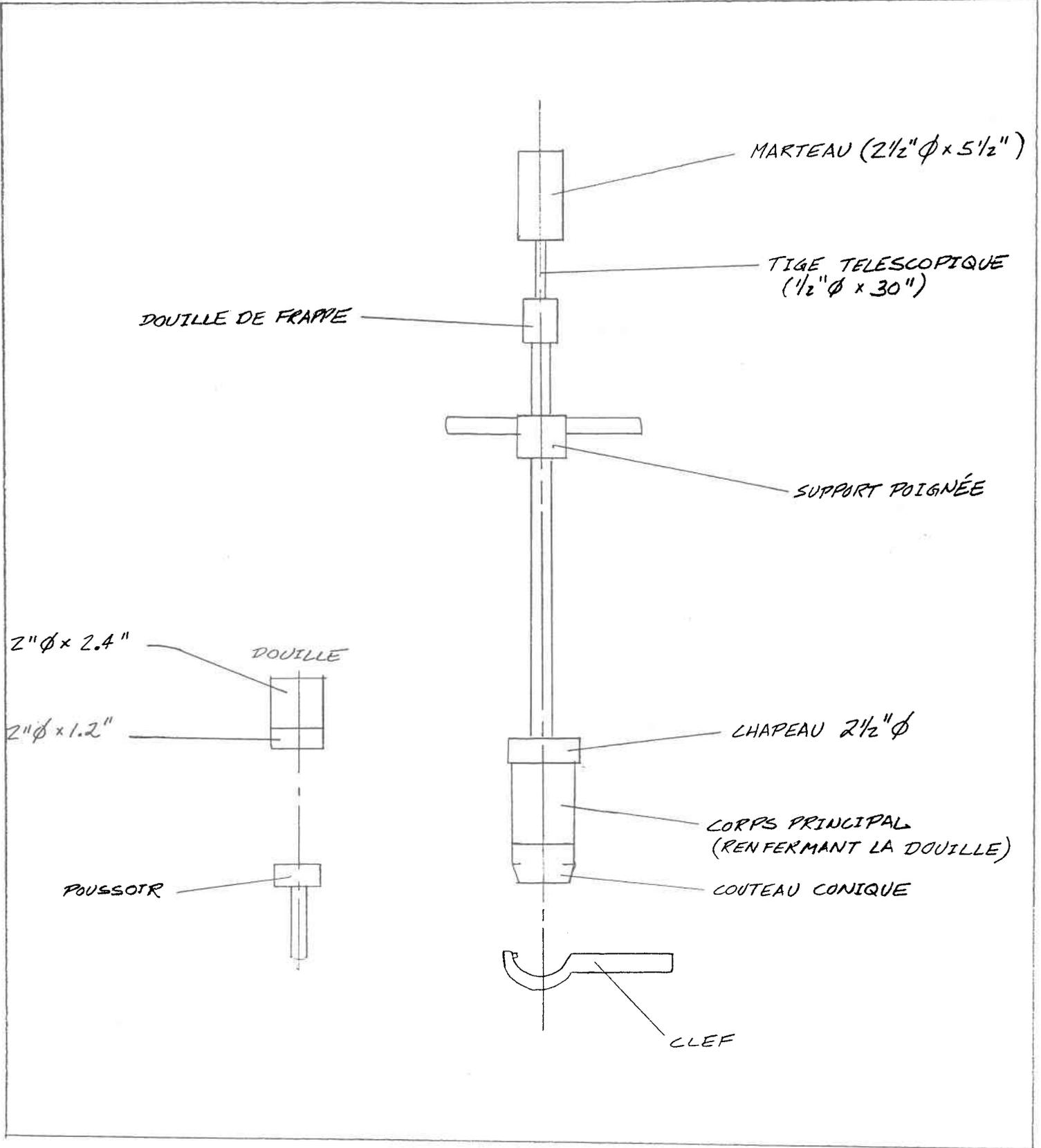
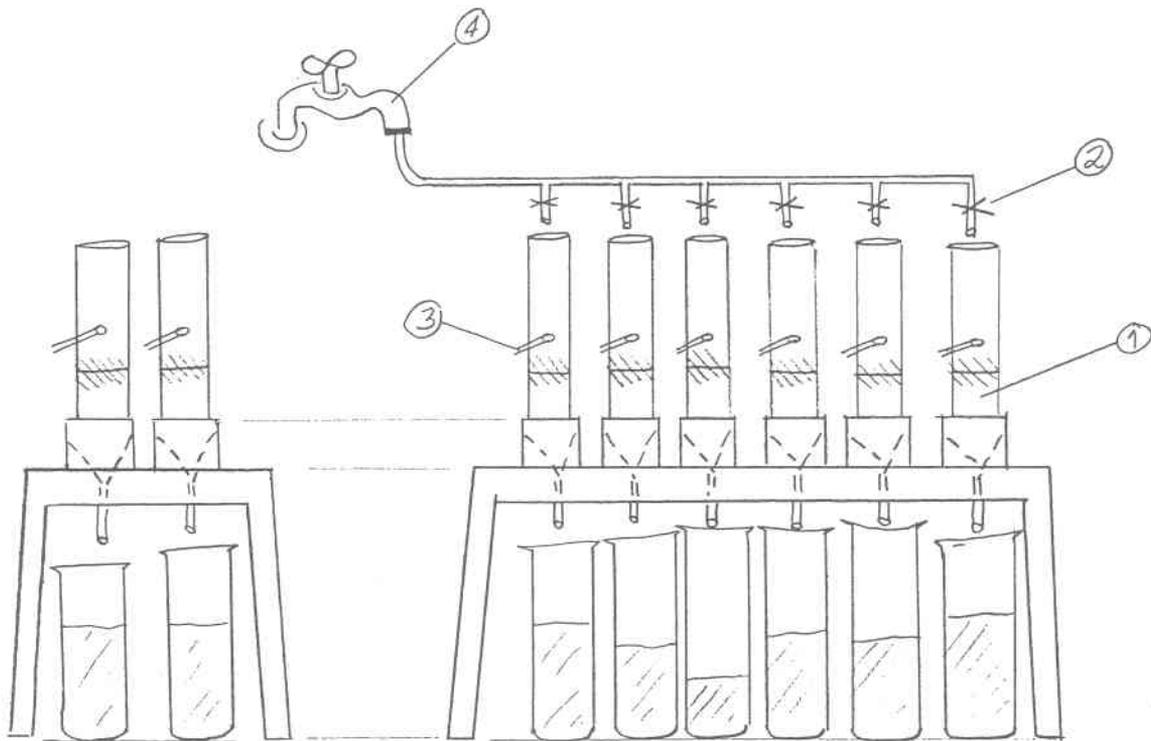
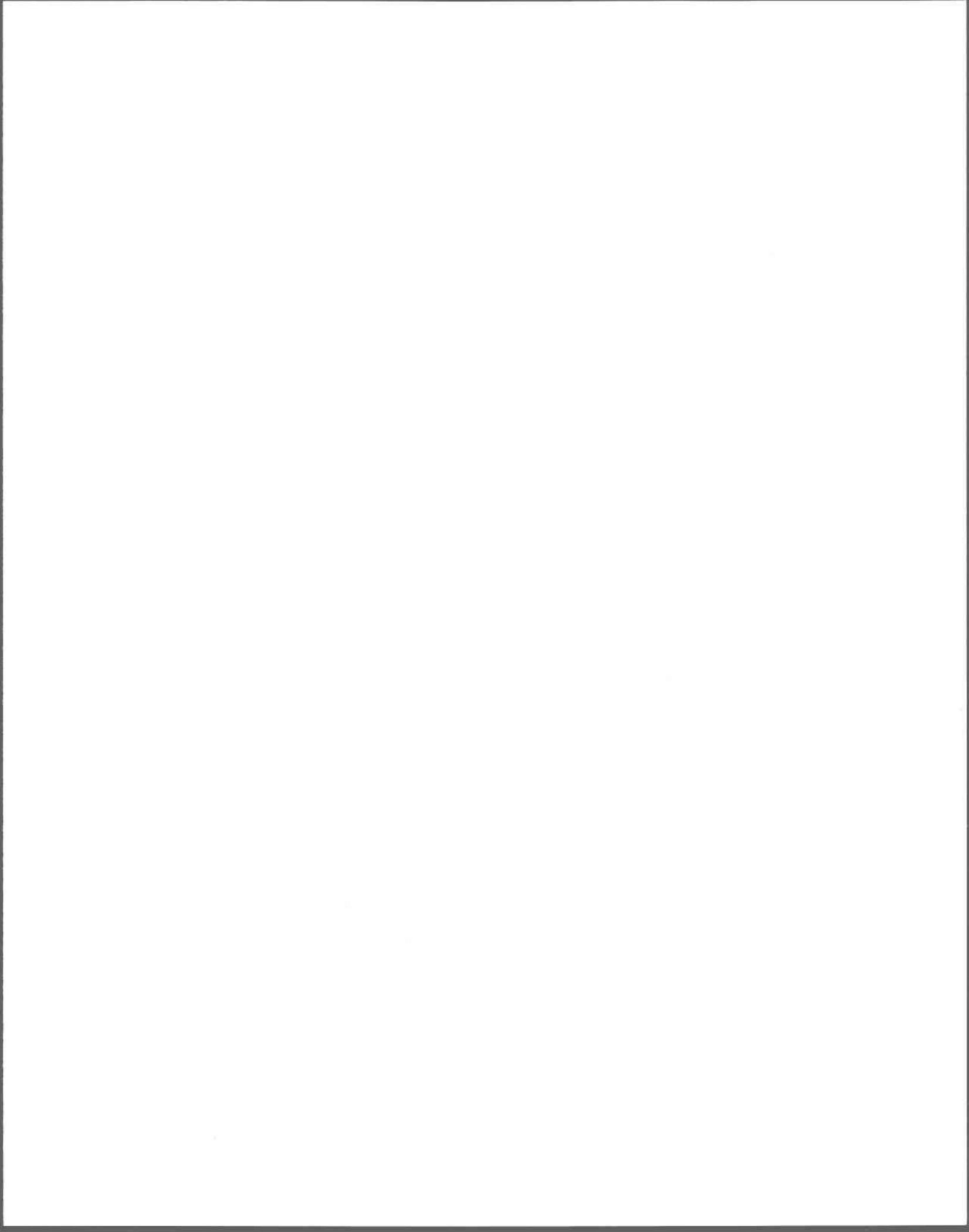


FIGURE A-4: SCHEMA DU MONTAGE DE MESURE
DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE



- ① : DOUILLE INTERNE AVEC SOL NON-REMANIÉ
- ② : PINCE POUR DISTRIBUTION DU DEBIT
- ③ : TROP-PLEIN POUR MAINTENIR UNE CHARGE CONSTANTE
- ④ : ALIMENTATION EN CONTINU



ANNEXE B

Résultats d'analyses

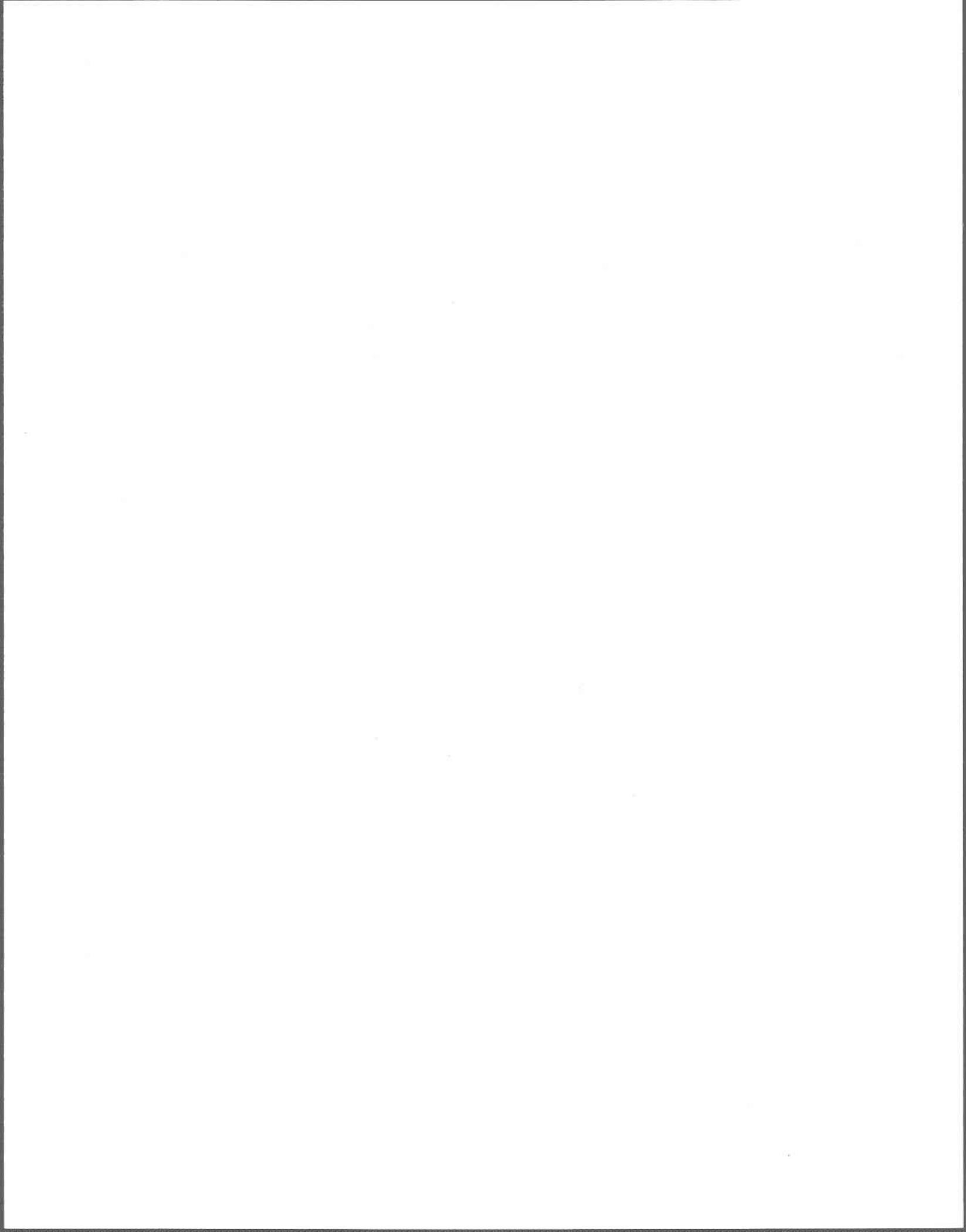


TABLEAU B-1: SAINT-AUGUSTIN HORIZON "A" (0 @ 35 cm)

STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm3)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
1	0.00029	48.3	32.9	18.8	1.52	41.8	2.81	1.63
2	0.01160	54.5	23.0	22.5	1.46	53.4	4.36	2.53
3	0.00489	47.8	27.5	24.7	1.49	46.6	4.80	2.78
4	0.00553	62.7	23.5	13.8	1.53	44.2	1.09	0.63
5	0.00024	57.2	24.4	18.4	1.71	40.8	2.72	1.58
6	0.00019	55.1	25.7	19.2	1.56	41.7	3.54	2.05
7	0.00260	52.8	25.7	21.5	1.41	50.0	4.64	2.69
8	0.00024	50.8	24.5	24.7	1.57	52.2	5.00	2.90
9	0.00073	52.2	25.5	22.3	1.56	46.9	4.47	2.59
10	0.00042	53.1	26.5	20.4	1.62	47.1	3.45	2.00
11	0.00034	54.8	23.9	21.3	1.53	42.2	3.78	2.19
12	0.00026	51.4	25.8	22.8	1.54	48.9	4.39	2.55
13	0.00477	50.0	24.3	25.7	1.32	33.6	5.20	3.02
14	0.00013	52.3	24.8	22.9	1.61	38.7	3.17	1.84
15	0.00027	54.3	24.0	21.7	1.60	42.6	3.72	2.16
16	0.00532	52.5	25.2	22.3	1.39	48.2	3.82	2.22
17	0.00094	52.8	25.8	21.4	1.37	44.9	4.90	2.84
18	0.00031	54.0	24.5	21.5	1.57	28.1	4.05	2.35
19	0.00147	57.0	22.7	20.3	1.48	48.1	3.34	1.94
20	0.00034	53.4	24.7	21.9	1.51	44.4	3.96	2.30
21	0.00231	55.3	22.8	21.9	1.34	46.2	4.15	2.41
22	0.01040	50.6	26.8	22.6	1.27	54.2	4.33	2.51
23	0.00877	53.2	24.1	22.7	1.41	43.8	3.11	1.80
24	0.00374	53.0	24.1	22.9	1.54	44.7	3.42	1.98
25	0.00066	53.0	24.2	22.8	1.60	43.7	3.77	2.19

TABLEAU B-2: SAINT-AUGUSTIN HORIZON "B" (35 @ 75 cm)

STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm ³)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
1	0.00094	64.1	22.4	13.5	1.66	45.5	1.81	1.05
2	0.00491	49.2	24.0	26.8	0.94	64.9	7.76	4.50
3	0.00004	49.1	27.8	23.1	1.62	43.5	3.27	1.90
4	0.01810	63.2	24.5	12.3	1.43	48.8	2.80	1.62
5	0.01130	67.3	19.0	13.7	1.08	--	1.91	1.11
6	0.01250	65.4	21.9	12.7	1.37	38.7	2.81	1.63
7	0.00552	48.0	27.2	24.8	1.30	45.5	4.26	2.47
8	0.00244	49.1	31.1	19.8	1.58	52.9	3.00	1.74
9	0.00404	60.0	24.4	15.6	1.51	48.0	2.36	1.37
10	0.00095	54.0	27.5	18.5	1.36	44.8	2.82	1.64
11	0.00040	50.0	31.2	18.8	1.39	43.1	2.50	1.45
12	0.00341	46.8	25.6	27.6	1.34	46.7	4.98	2.89
13	0.00372	47.6	27.3	25.1	1.46	42.4	3.26	1.89
14	0.00417	67.2	19.0	13.8	1.53	45.0	2.19	1.27
15	0.00476	50.9	30.1	19.0	1.41	49.5	2.68	1.55
16	0.00359	52.8	30.2	17.0	1.32	45.7	2.96	1.72
17	0.00982	49.3	28.0	22.7	1.32	49.4	4.91	2.85
18	0.00127	59.6	22.3	18.1	1.39	40.3	2.83	1.64
19	0.00170	57.9	22.3	19.8	1.43	50.5	2.06	1.19
20	0.00088	53.4	25.9	20.7	1.65	43.3	1.53	0.89
21	0.00263	63.7	20.2	16.1	1.45	47.8	2.51	1.46
22	0.00154	40.8	31.0	28.2	1.39	51.8	4.11	2.38
23	0.01320	60.1	25.4	14.5	1.52	47.7	--	--
24	0.00116	46.3	29.7	24.0	1.35	48.3	2.73	1.58
25	0.00179	48.7	29.0	22.3	1.56	41.9	2.45	1.42

TABLEAU B-3: SAINT-AUGUSTIN HORIZON "C" (75 @ 115 cm)

STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm ³)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
1	0.00187	68.0	18.7	13.3	1.67	44.3	2.17	1.26
2	0.00073	66.8	17.1	16.1	1.44	50.6	2.99	1.73
3	0.00427	84.0	9.5	6.5	1.48	47.9	2.18	1.26
4	0.00006	59.8	26.5	13.7	1.81	42.9	1.82	1.06
5	0.01020	69.2	18.9	11.9	1.57	43.9	1.63	0.95
6	0.00106	70.2	15.7	12.3	1.55	38.4	1.64	0.95
7	--	--	--	--	--	--	2.36	1.37
8	0.00543	56.1	24.6	19.3	1.30	48.8	2.36	1.37
9	0.02260	64.0	23.6	12.4	1.46	47.3	1.76	1.02
10	0.00106	64.5	21.7	13.8	1.72	40.5	1.65	0.96
11	0.00295	83.2	7.8	9.0	1.69	36.3	2.36	1.37
12	0.00359	64.7	19.7	15.6	1.41	46.7	2.70	1.57
13	0.00010	63.8	20.7	15.5	1.70	38.1	2.09	1.21
14	0.00138	67.1	21.7	11.2	1.61	44.5	2.11	1.22
15	0.00227	68.2	17.7	14.1	1.55	46.1	1.30	0.75
16	0.00898	68.1	14.1	17.8	1.27	44.8	1.41	0.82
17	0.00012	66.0	16.4	17.6	1.56	45.2	2.86	1.66
18	0.00037	65.9	19.5	14.6	1.42	68.4	1.74	1.01
19	0.00262	65.0	20.5	14.5	1.55	43.7	1.66	0.96
20	0.00547	59.3	22.9	17.8	1.49	38.5	1.80	1.04
21	0.00262	71.3	13.0	15.7	1.36	42.1	1.57	0.91
22	0.00007	56.3	21.3	22.4	1.20	63.5	3.51	2.04
23	0.00770	66.2	21.6	12.2	1.44	46.1	1.12	0.65
24	0.00107	75.2	13.7	11.1	1.56	42.5	1.13	0.66
25	0.00072	54.7	24.8	20.5	1.35	41.9	1.94	1.13

TABLEAU B-4: L'ASSOMPTION HORIZON " A" (0 @ 30 cm)

STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm3)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
26	0.00770	77.0	11.0	12.0	1.46	43.4	3.42	1.98
27	0.00092	76.7	10.8	12.5	1.66	39.1	2.89	1.68
28	0.00738	78.8	9.7	11.5	1.64	44.4	3.06	1.77
29	0.00075	83.2	6.4	10.4	1.84	37.9	2.79	1.62
30	0.00585	85.2	6.9	7.9	1.61	38.7	2.44	1.42
31	0.00781	79.9	8.5	11.6	1.57	40.8	3.40	1.97
32	0.00726	81.7	7.2	11.1	1.64	35.7	--	--
33	0.01170	80.7	6.2	13.1	1.44	43.1	2.74	1.59
34	0.00597	85.8	6.7	7.5	1.54	40.9	3.08	1.79
35	0.01600	86.1	6.7	7.2	1.47	51.2	2.84	1.65
36	0.00283	80.0	9.8	10.2	1.67	39.4	3.58	2.08
37	0.00807	80.7	9.0	10.3	1.59	35.5	5.49	3.18
38	0.00662	81.8	8.1	10.1	1.61	42.8	3.36	1.95
39	0.00936	84.0	8.1	7.9	1.41	43.3	3.05	1.77
40	0.00293	84.0	8.1	7.9	1.65	34.4	2.65	1.54
41	0.00303	80.0	9.8	10.2	1.67	37.8	3.48	2.02
42	0.00152	82.6	9.3	8.1	1.76	31.9	2.90	1.68
43	0.00382	83.4	8.7	7.9	1.69	36.1	2.95	1.71
44	0.00216	83.0	8.1	8.9	1.59	39.2	3.04	1.76
45	0.00441	84.4	8.4	7.2	1.61	44.7	2.99	1.73
46	0.00450	82.0	10.2	7.8	1.48	37.4	3.28	1.90
47	0.00179	84.4	7.0	8.6	1.64	32.6	2.69	1.56
48	0.00414	85.0	7.7	7.3	1.65	41.4	2.57	1.49
49	0.00456	84.8	7.7	7.5	1.63	41.4	3.05	1.77
50	0.00587	84.0	9.5	6.5	1.57	41.7	2.98	1.73

TABLEAU B-5: L'ASSOMPTION HORIZON "B" (30 @ 80 cm)

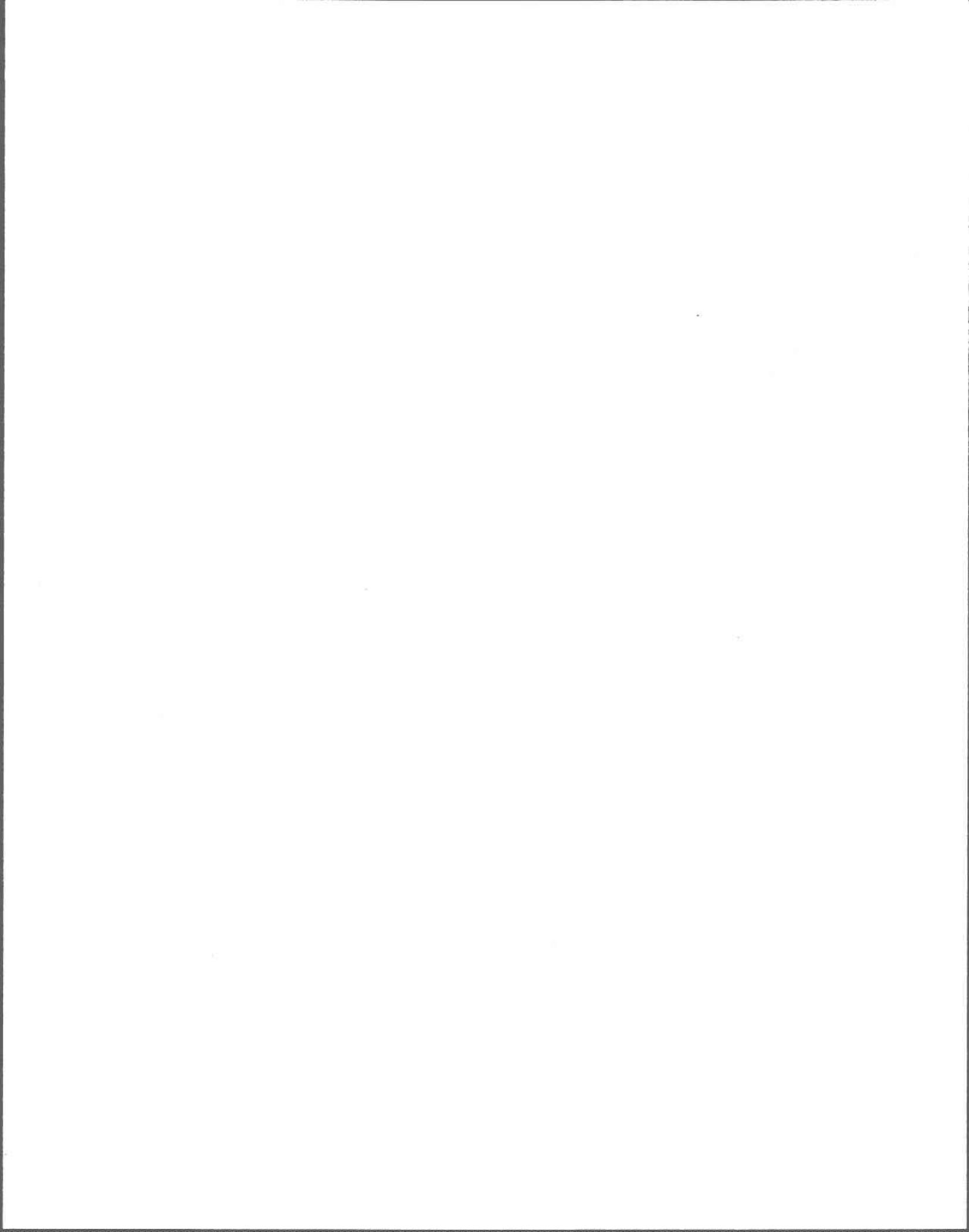
STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm3)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
26	0.00202	78.2	7.8	14.0	1.64	43.7	1.78	1.03
27	0.00277	91.8	2.3	5.9	1.69	37.7	0.71	0.41
28	0.02240	89.1	4.6	6.3	1.57	37.1	1.25	0.73
29	0.00153	90.6	3.0	6.4	1.61	43.2	1.21	0.70
30	0.00573	87.2	3.8	9.0	1.40	28.4	1.40	0.81
31	0.00161	44.0	21.1	34.9	1.44	41.9	1.52	0.88
32	0.01550	80.5	7.8	11.7	1.53	38.6	1.03	0.60
33	0.00232	85.3	3.5	11.2	1.55	44.1	0.89	0.52
34	0.00349	90.2	2.8	7.0	1.52	45.6	1.22	0.71
35	0.00654	75.1	9.7	15.2	1.46	44.8	1.11	0.64
36	0.00131	75.1	7.4	17.5	1.59	44.0	1.59	0.92
37	0.01570	95.5	0.9	3.6	1.60	40.9	0.61	0.35
38	0.03110	96.2	0.4	3.4	1.58	37.7	0.69	0.40
39	0.02600	95.0	2.0	3.0	1.56	44.2	1.29	0.75
40	0.02730	92.5	3.2	4.3	1.62	41.1	1.04	0.60
41	0.00000	62.0	12.7	25.3	1.70	39.9	1.53	0.89
42	0.00003	41.0	23.4	35.6	1.47	54.0	1.45	0.84
43	0.00037	62.0	13.9	24.1	1.41	47.1	2.76	1.60
44	0.00067	55.0	14.0	31.0	1.42	51.7	2.07	1.20
45	0.01110	77.3	9.3	13.4	1.43	48.5	1.29	0.75
46	0.01620	92.0	4.1	3.9	1.62	40.8	0.83	0.48
47	0.00025	65.0	12.6	22.4	1.56	50.3	1.29	0.75
48	0.00011	41.0	21.6	37.4	1.45	47.3	1.61	0.93
49	0.00247	84.0	8.3	7.7	1.46	38.4	2.44	1.42
50	0.00134	88.7	5.7	5.6	1.60	34.7	1.82	1.06

TABLEAU B-6: L'ASSOMPTION HORIZON "C" (80 @ 125 cm)

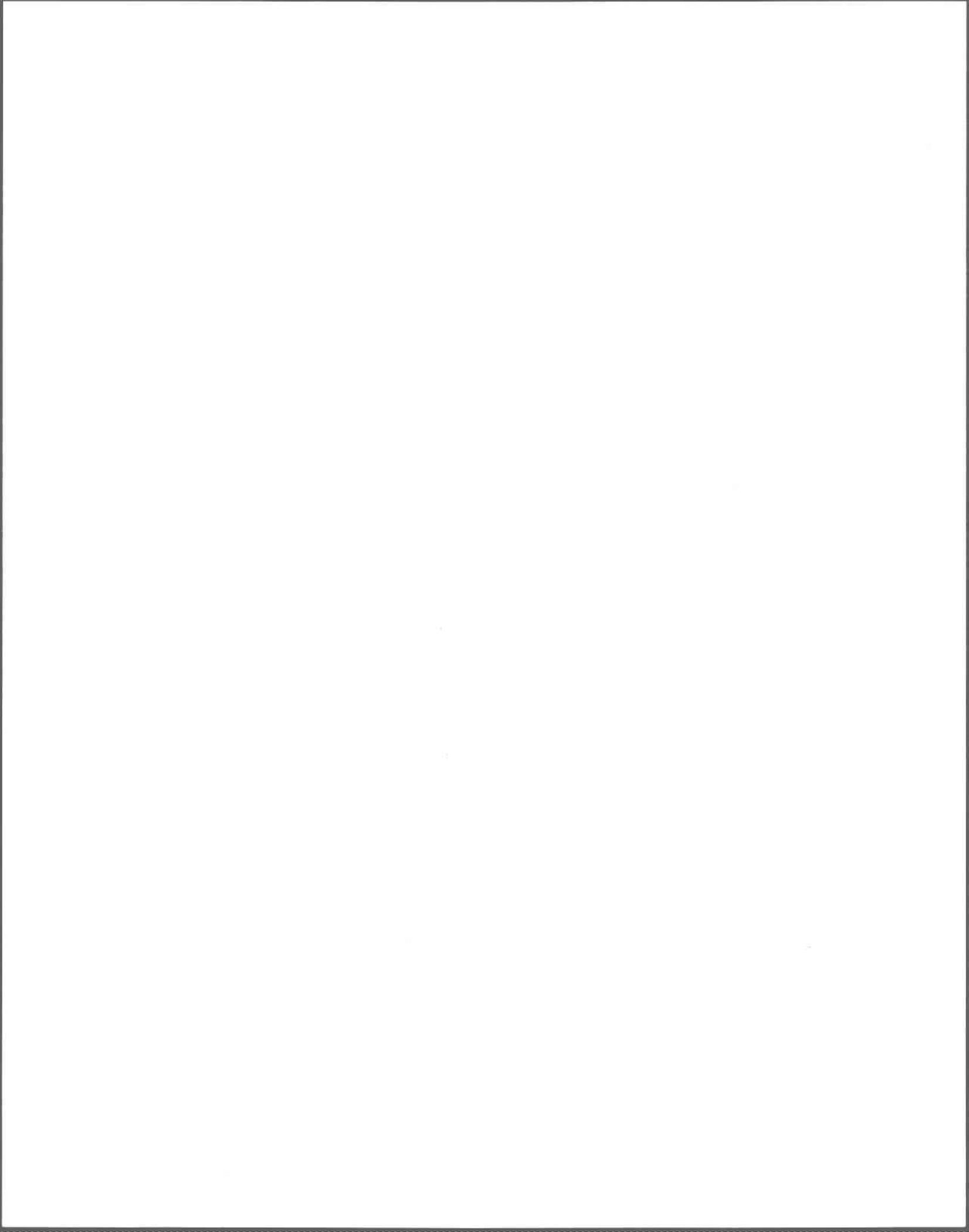
STA (#)	KK (cm/sec)	SAB (%)	LIM (%)	ARG (%)	MVSEC (g/cm3)	PORO (%)	MATORG (%)	C-ORG (%)
26	--	--	--	--	--	--	1.40	0.81
27	0.00133	65.8	19.3	14.9	1.90	40.2	0.98	0.57
28	0.00037	64.9	20.6	14.5	1.58	43.1	0.89	0.52
29	0.00000	54.9	23.6	21.5	1.65	46.5	0.86	0.50
30	0.00443	87.0	3.0	10.0	1.41	37.8	1.73	1.00
31	0.00141	65.0	16.4	18.6	1.76	33.3	0.70	0.41
32	0.00164	63.3	18.4	18.3	1.59	47.9	0.92	0.53
33	0.00334	71.0	18.4	10.6	1.64	35.5	0.84	0.49
34	--	--	--	--	--	--	1.20	0.70
35	0.00214	83.2	3.5	13.3	1.46	46.6	1.00	0.58
36	0.00179	67.5	16.6	15.9	1.71	35.9	0.91	0.53
37	0.00131	65.2	16.9	17.9	2.12	21.0	3.12	1.81
38	0.00314	71.3	16.2	12.5	1.70	39.5	0.72	0.42
39	--	--	--	--	--	--	0.82	0.48
40	0.09370	95.6	1.3	3.1	1.63	38.6	0.52	0.30
41	--	--	--	--	--	--	1.26	0.73
42	0.00024	82.0	9.6	8.4	2.11	25.0	0.91	0.53
43	--	--	--	--	--	--	0.72	0.42
44	--	--	--	--	--	--	0.70	0.41
45	0.00009	61.2	20.7	18.1	1.61	44.8	0.96	0.56
46	--	--	--	--	--	--	--	--
47	--	--	--	--	--	--	--	--
48	0.00005	80.5	10.8	8.7	1.84	35.7	0.78	0.45
49	0.00332	82.8	9.2	8.0	1.75	31.0	0.81	0.47
50	0.00002	59.0	20.7	20.3	1.52	42.2	1.30	0.75

ANNEXE C

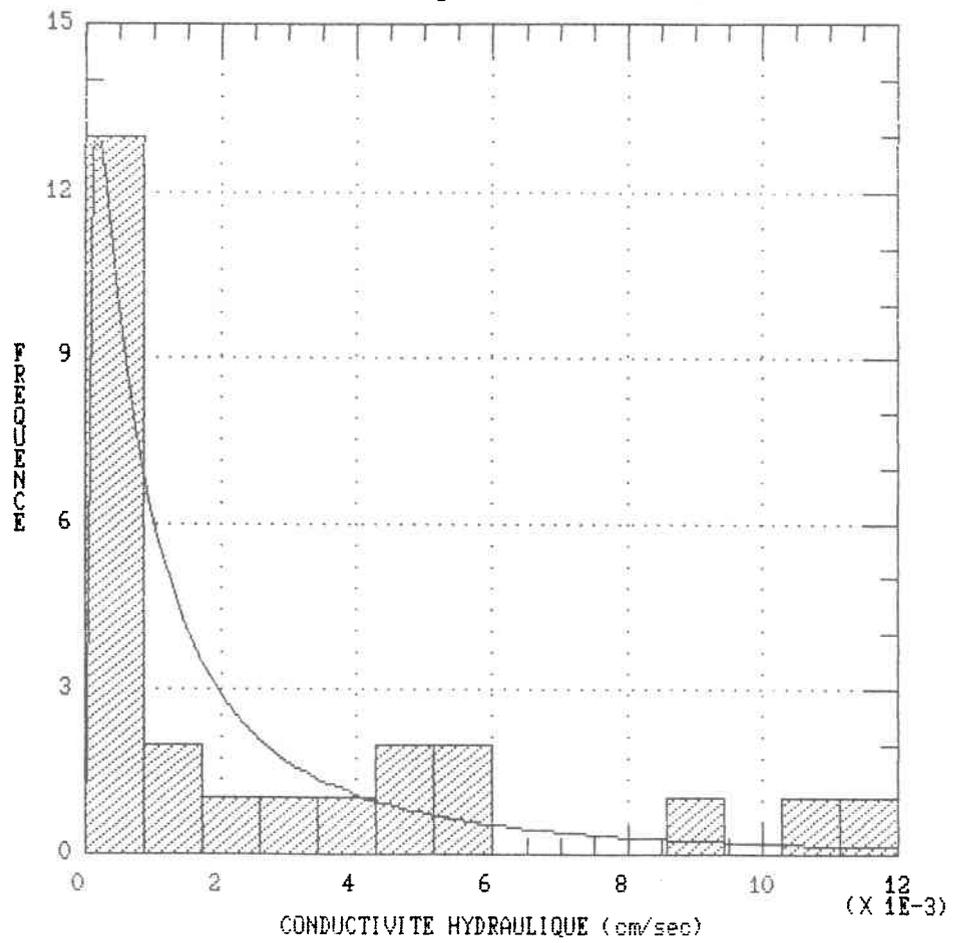
Distributions statistiques des propriétés des sols



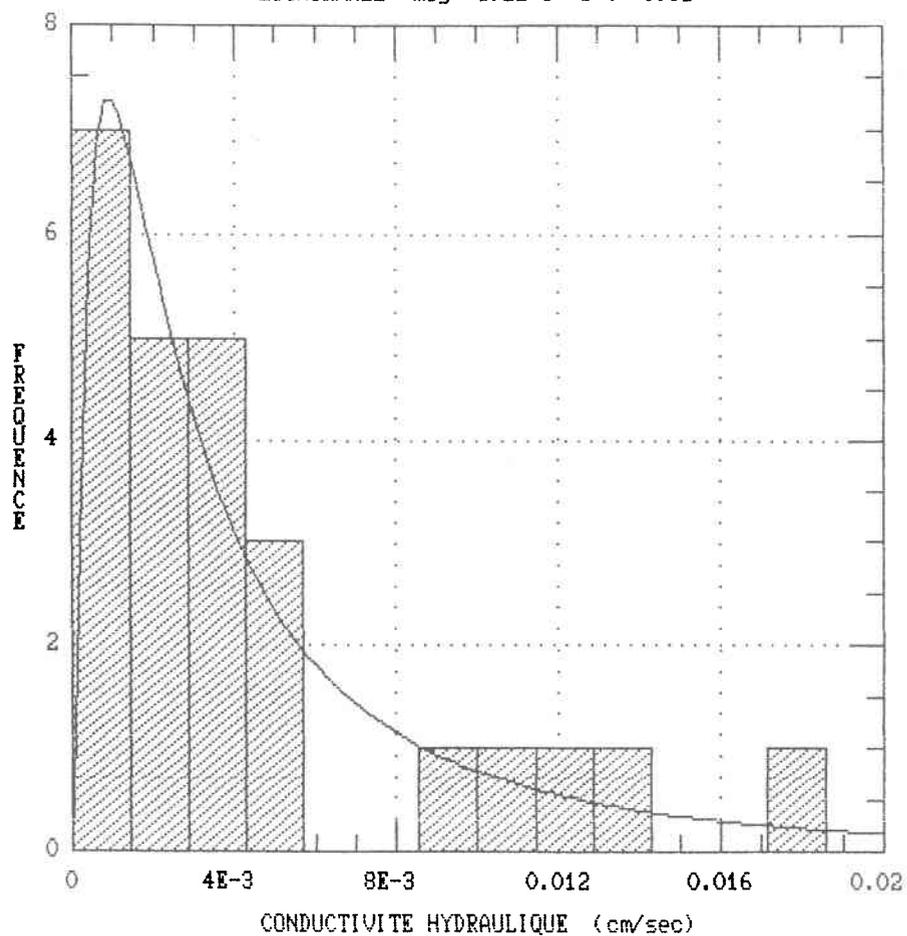
Conductivité hydraulique



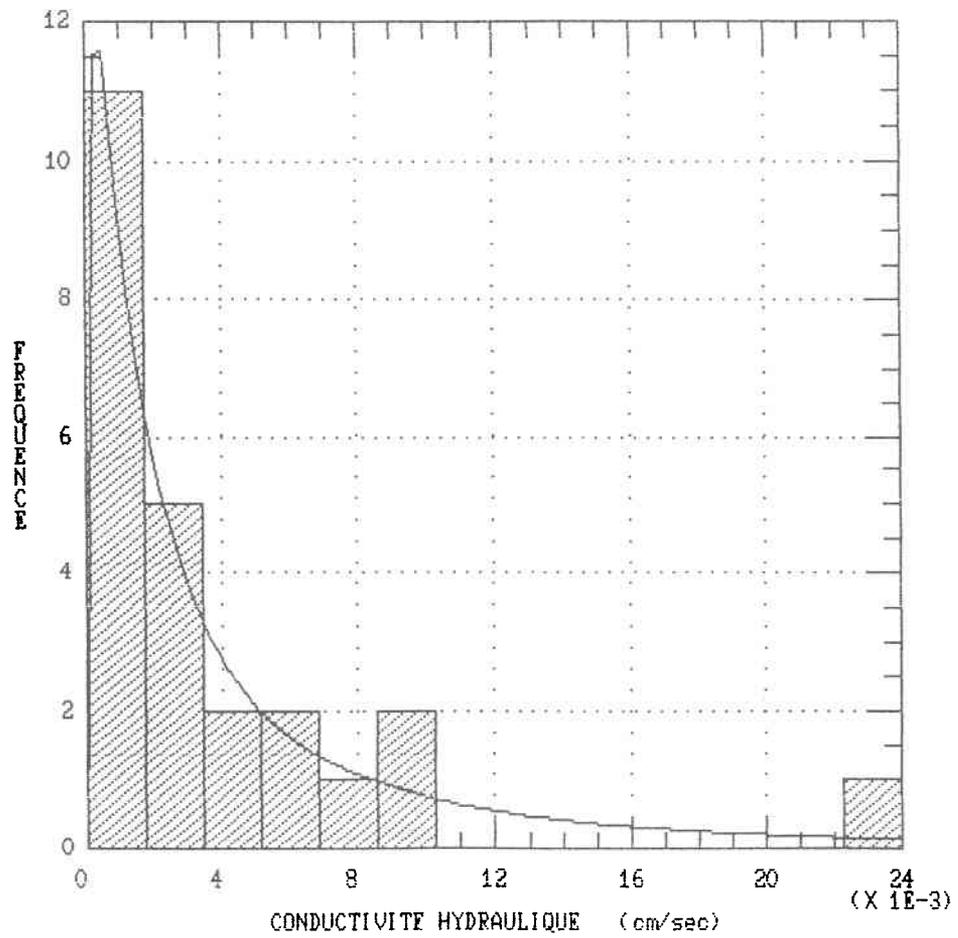
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ST-AUGUSTIN (A)
 LOGNORMALE moy: 3.25E-3 e-t: 8.0E-3



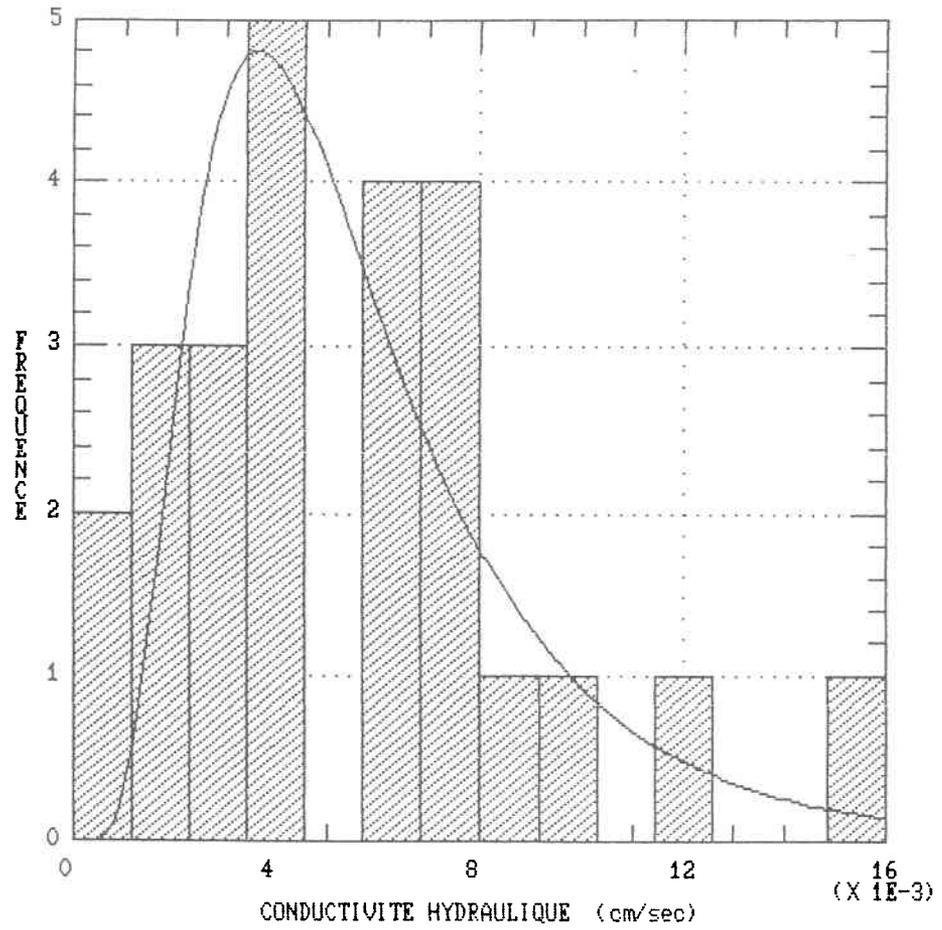
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ST-AUGUSTIN (B)
LOGNORMALE moy: 6.2E-3 e-t: 0.01



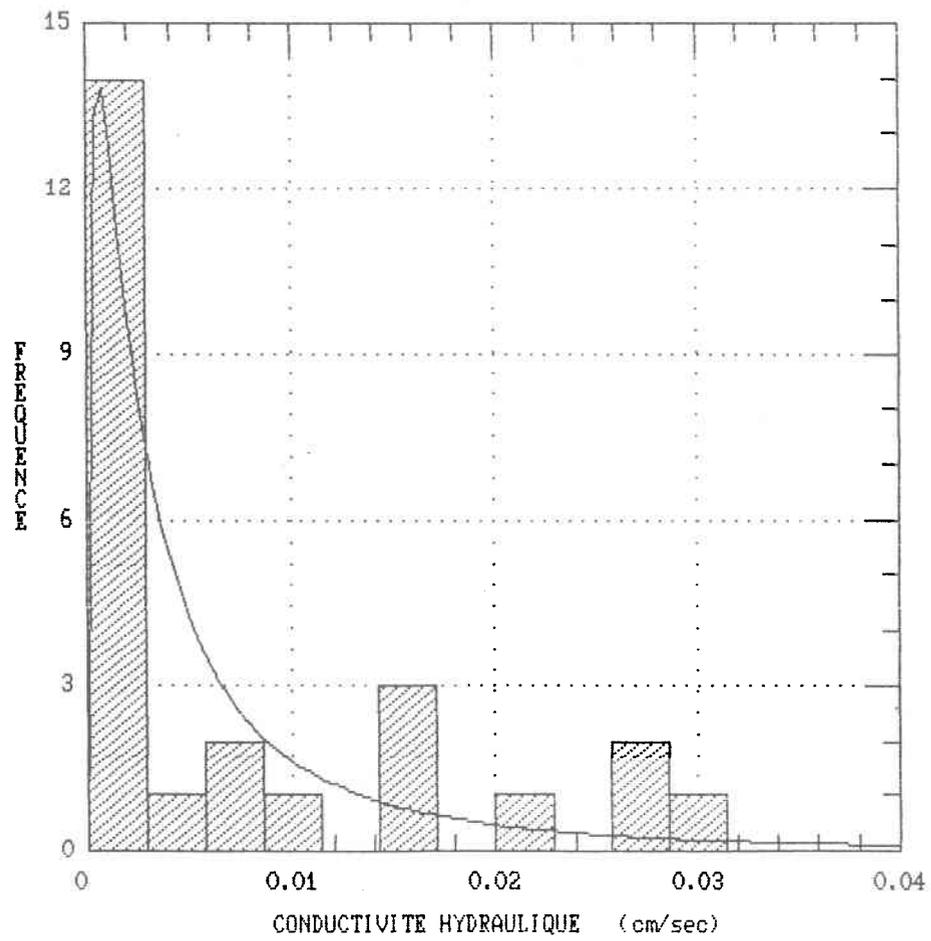
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ST-AUGUSTIN (C)
LOGNORMALE moy: 7.6E-3 e-t: 0.02



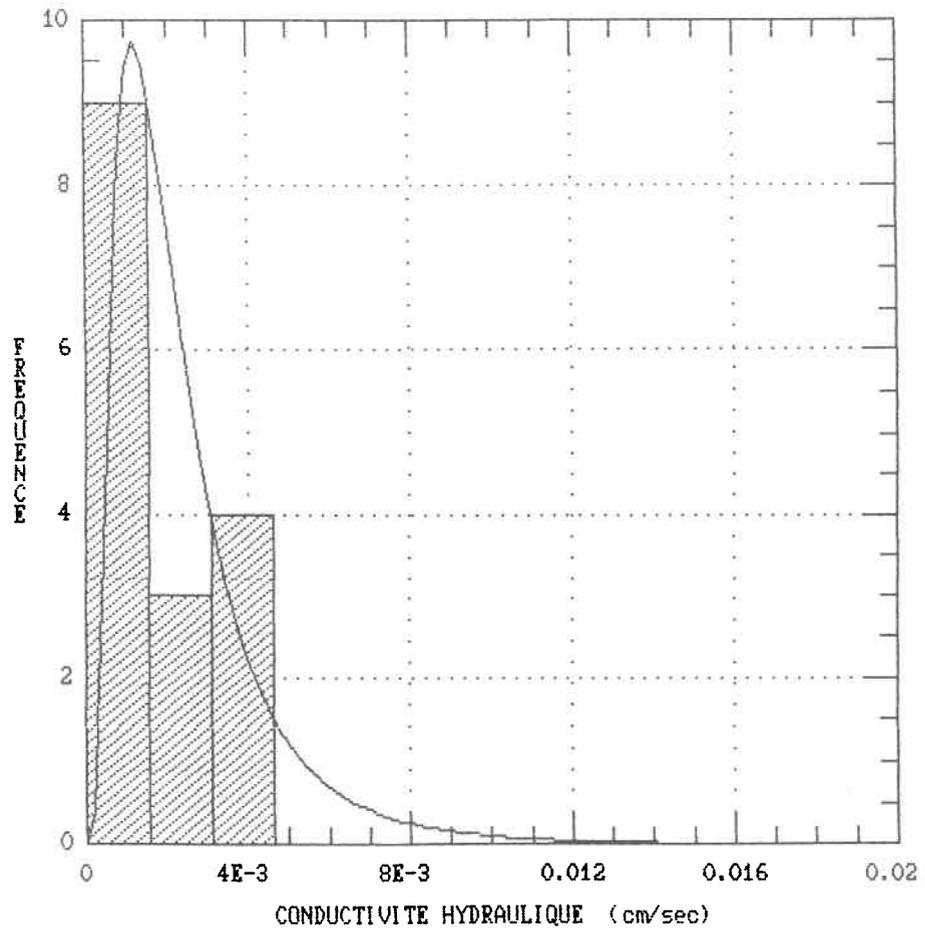
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE L'ASSOMPTION(A)
LOGNORMALE moy: 5.8E-3 e-t: 3.5E-3



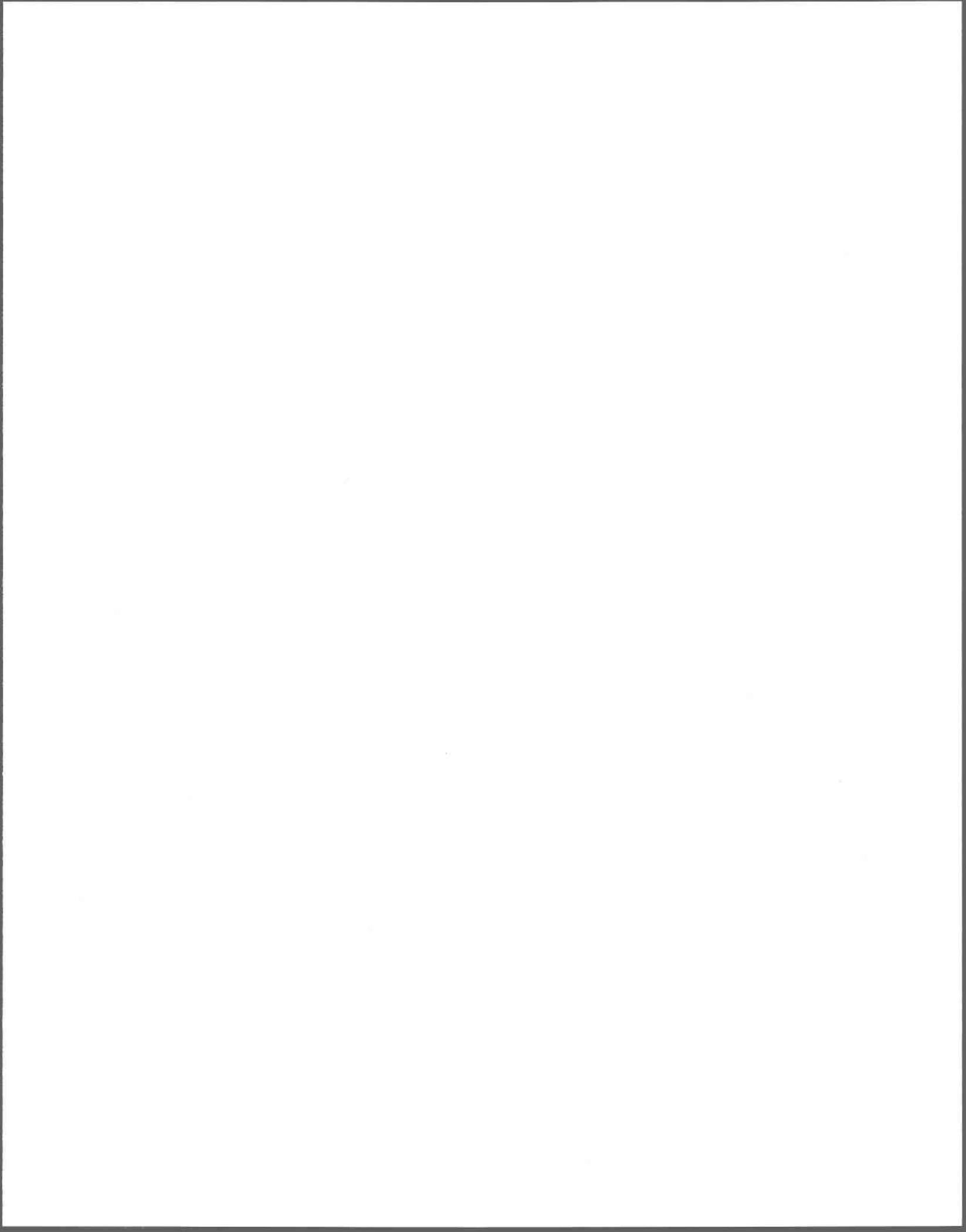
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE L'ASSOMPTION (B)
LOGNORMALE moy: 0.009 e-t: 0.02



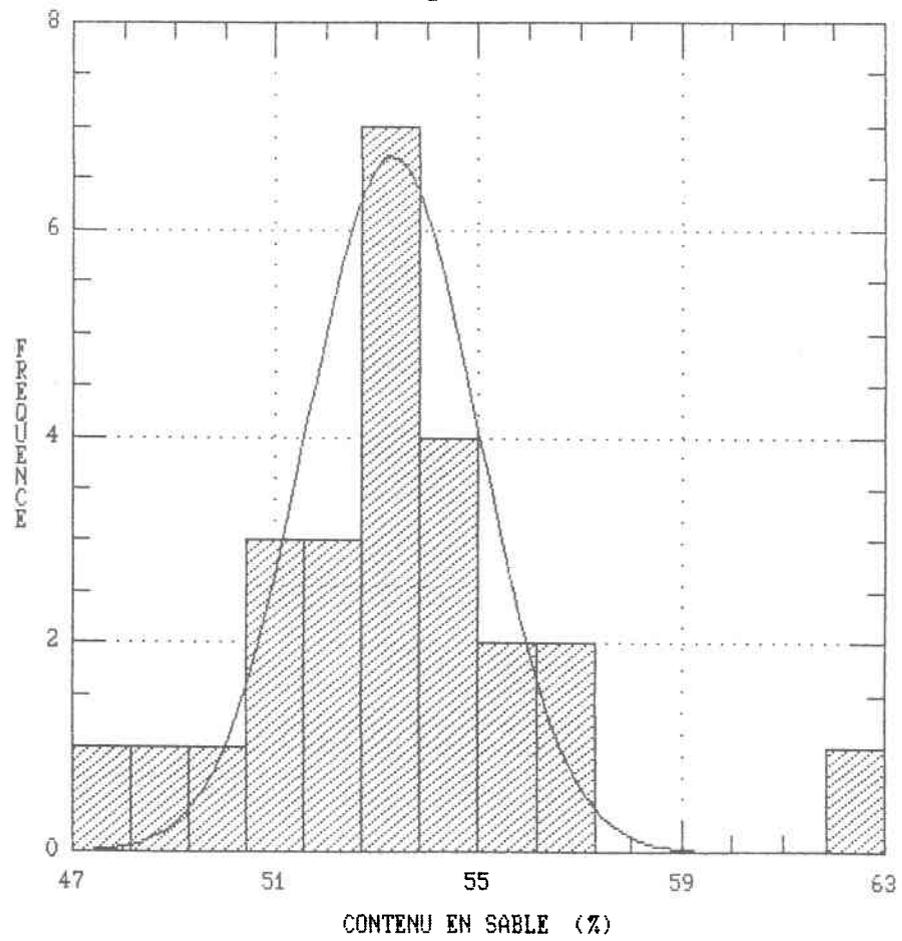
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE L'ASSOMPTION(C)
LOGNORMALE moy: 0.0025 e-t: 0.002



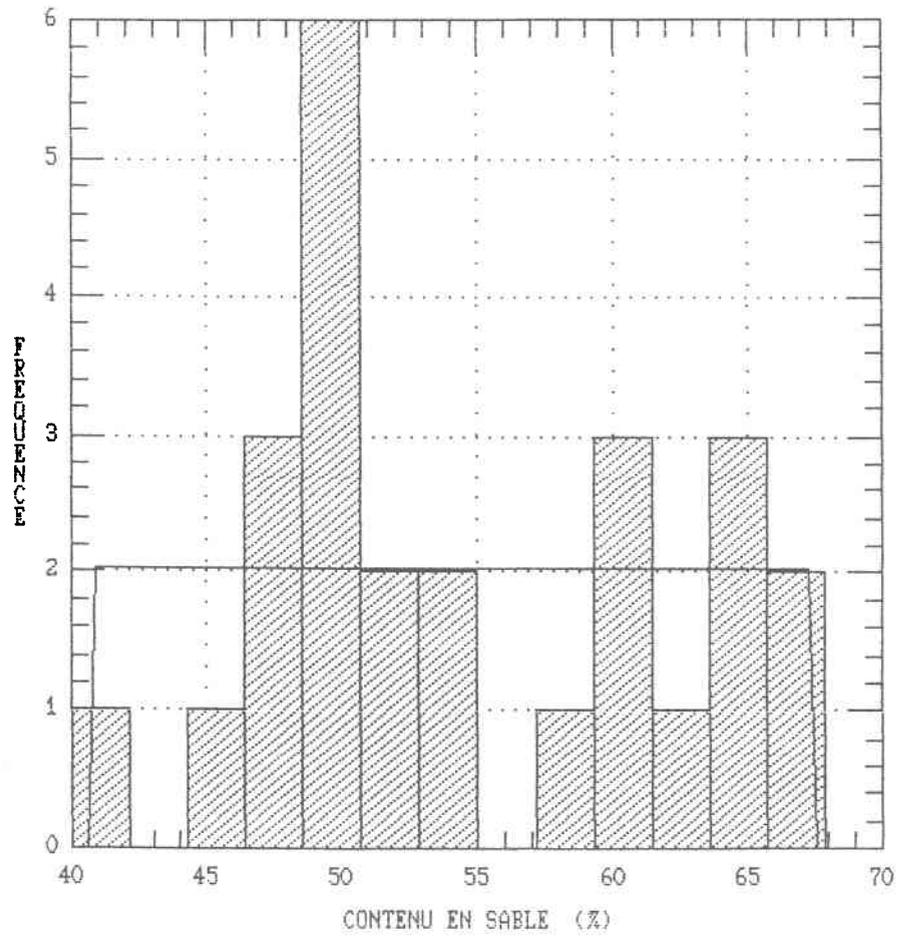
Contenu en sable



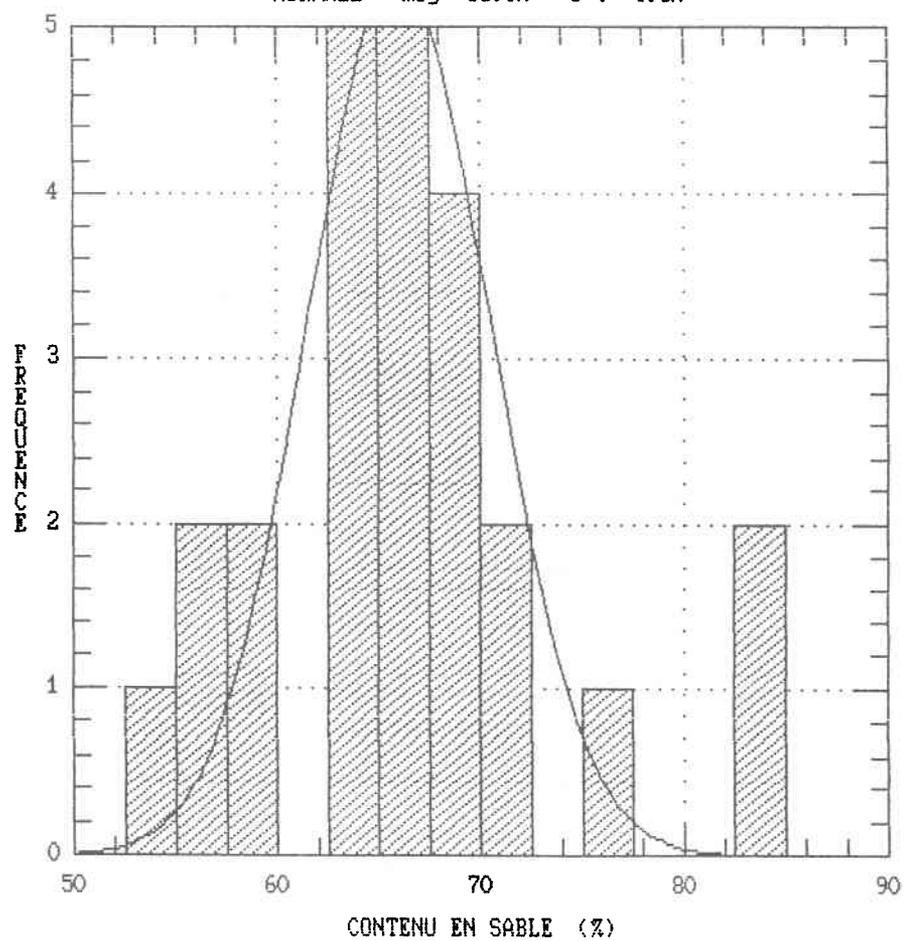
CONTENU EN SABLE ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 53.3% e-t: 1.7%



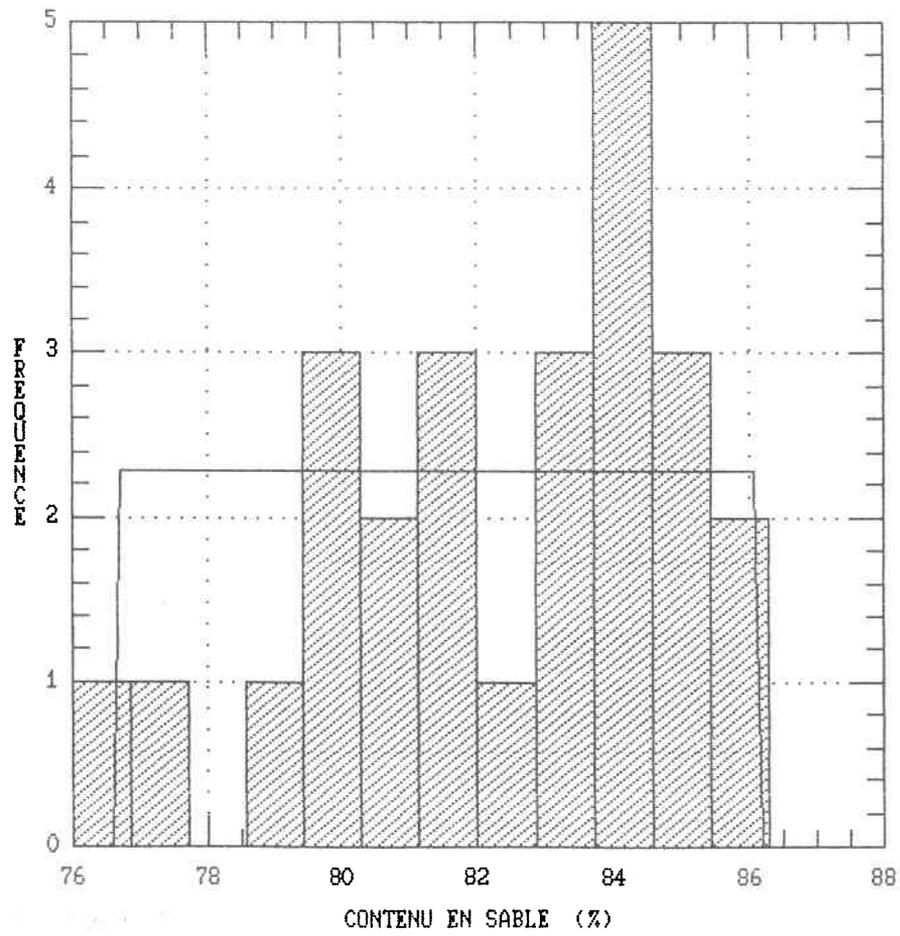
CONTENU EN SABLE ST-AUGUSTIN (B)
UNIFORME B.I: 40.8% B.S: 67.3%



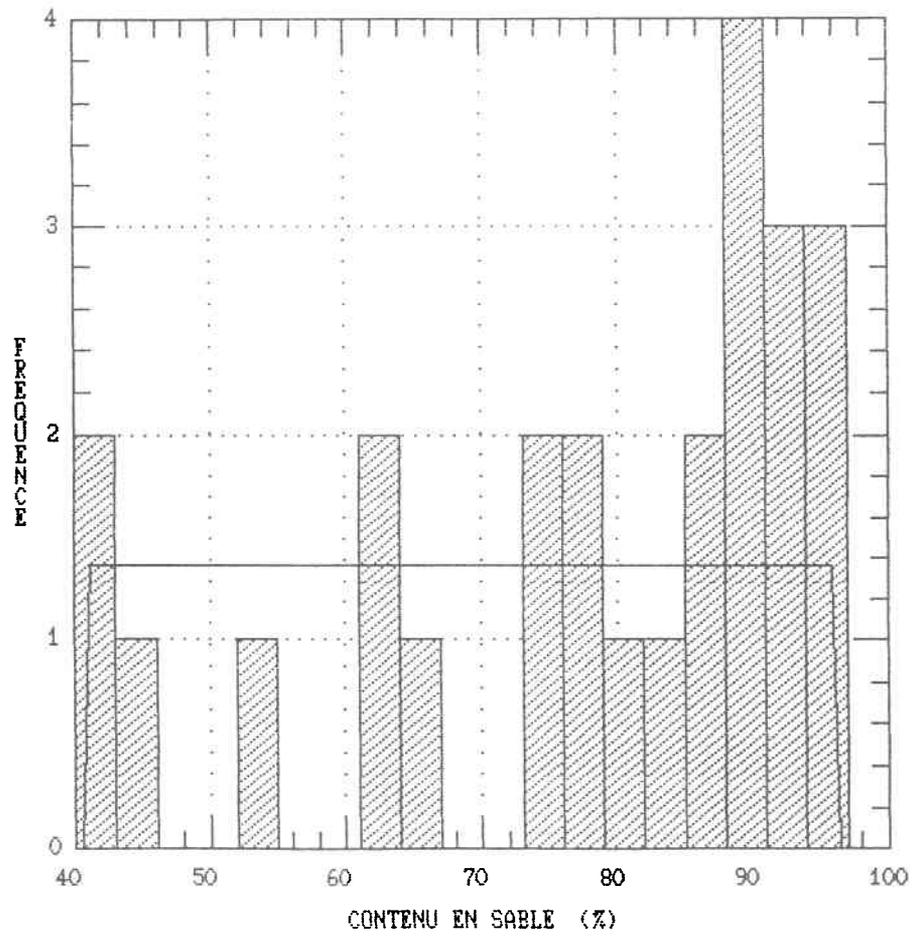
CONTENU EN SABLE ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 66.0% e-t: 4.5%



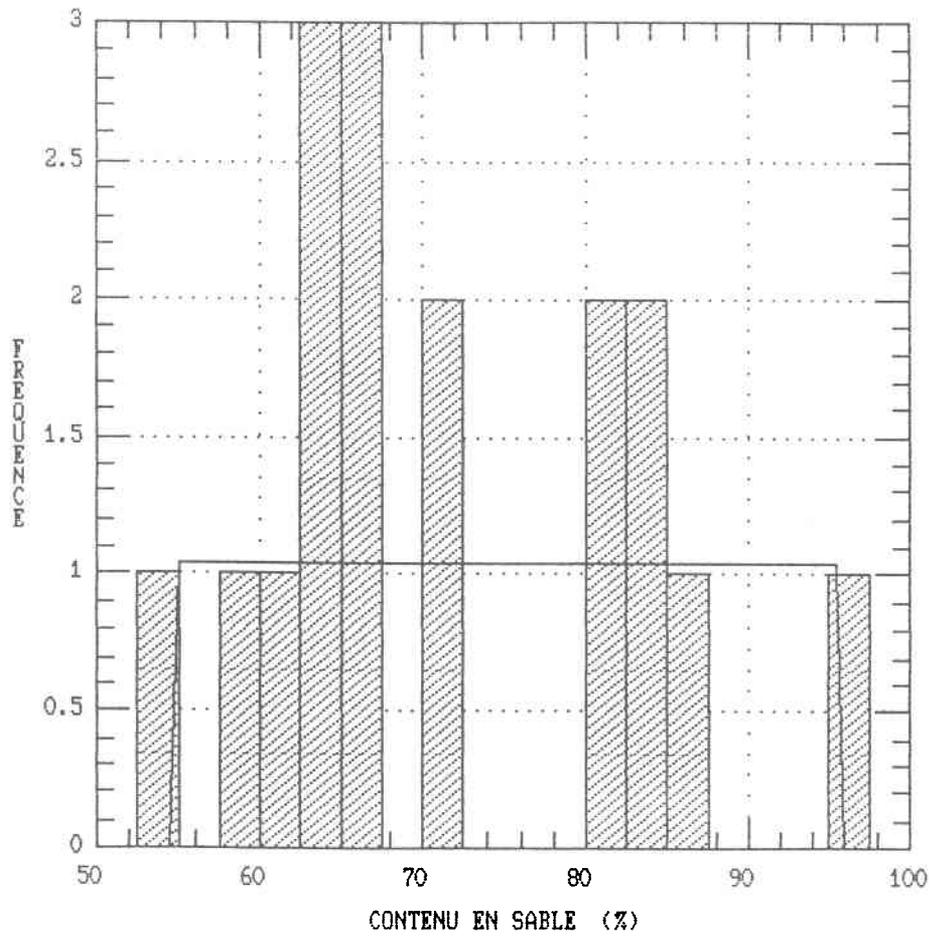
CONTENU EN SABLE L'ASSOMPTION (A)
UNIFORME B.1: 76.7% B.S: 86.1



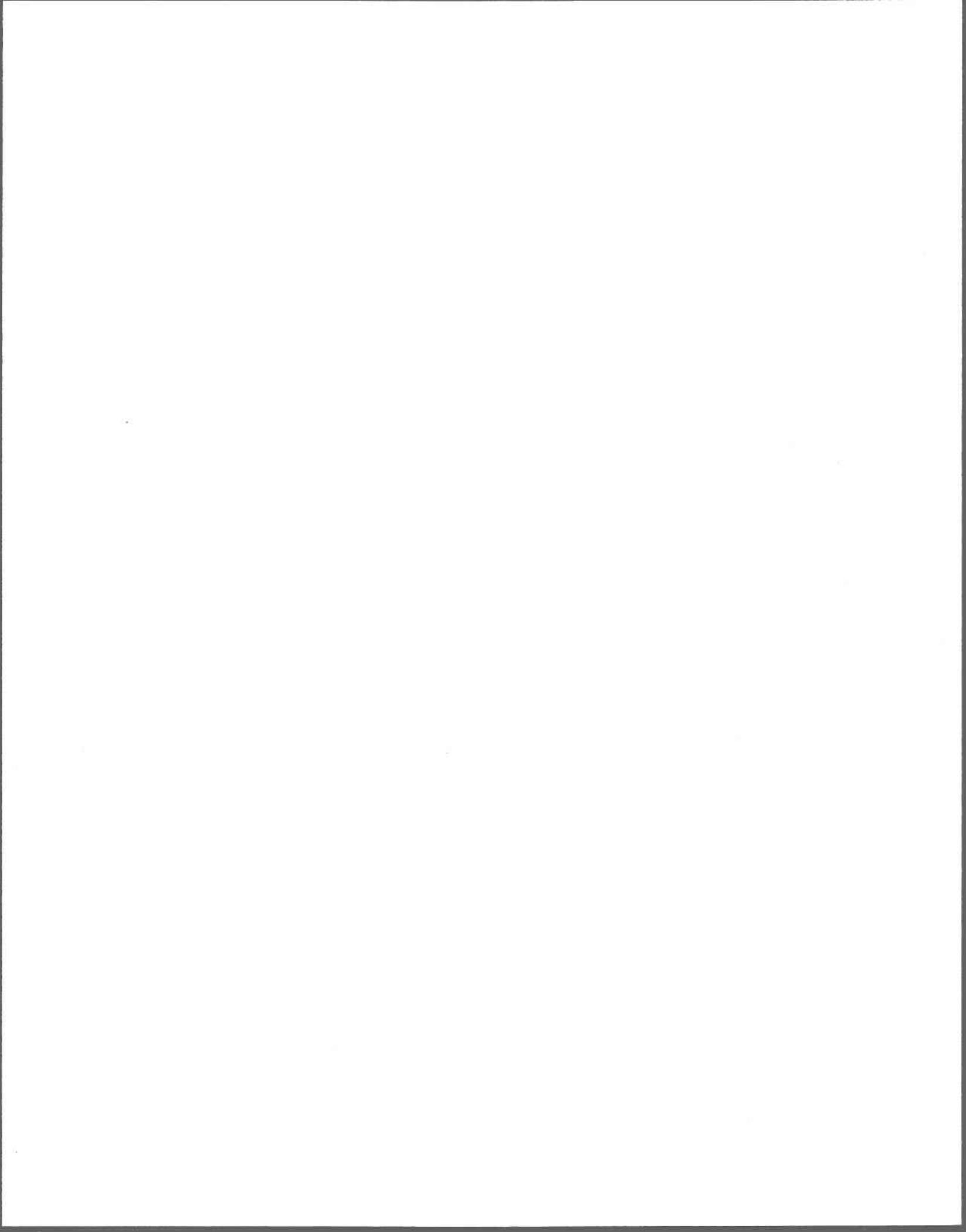
CONTENU EN SABLE L'ASSOMPTION (B)
 UNIFORME B.I: 40.0% B.S: 96.2%



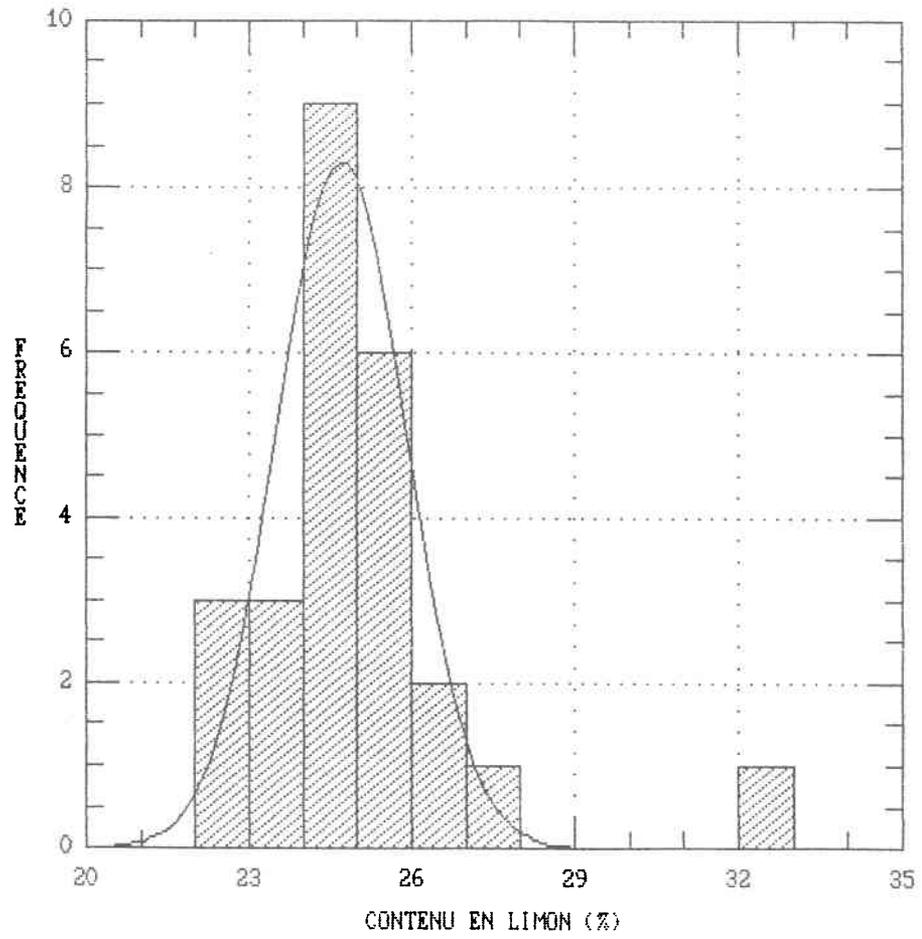
CONTENU EN SABLE L'ASSOMPTION (C)
UNIFORME B. I: 54.9% B. S: 95.6%



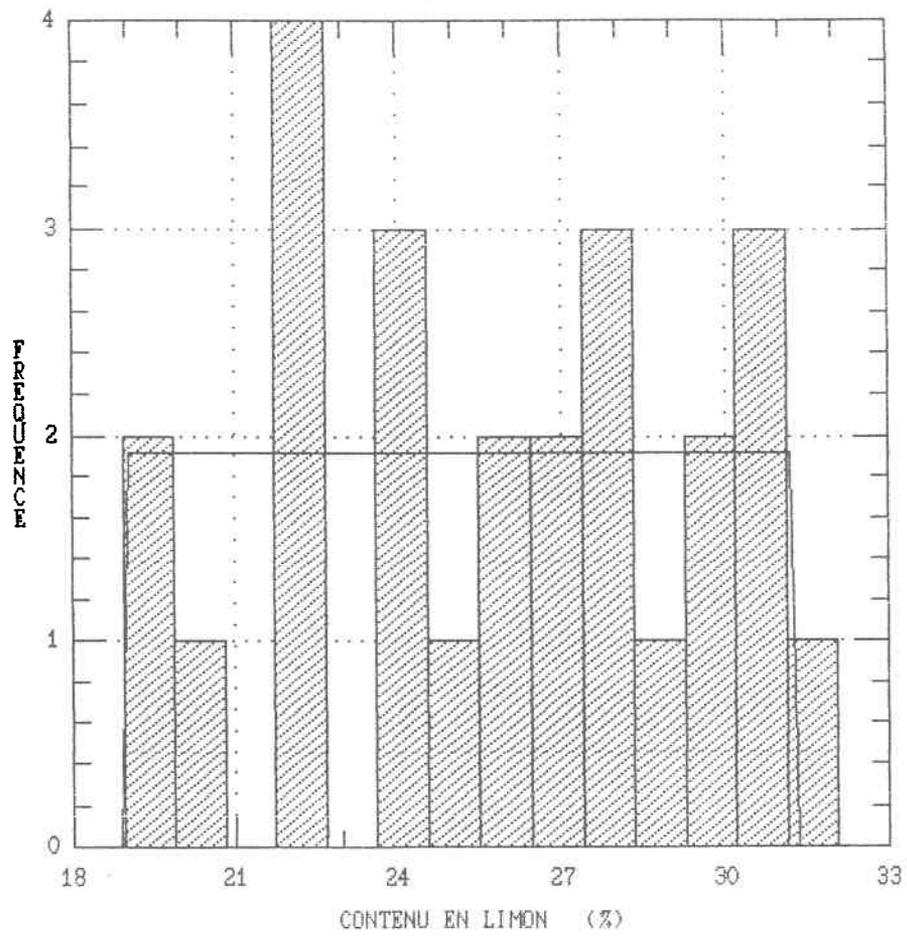
Contenu en limon



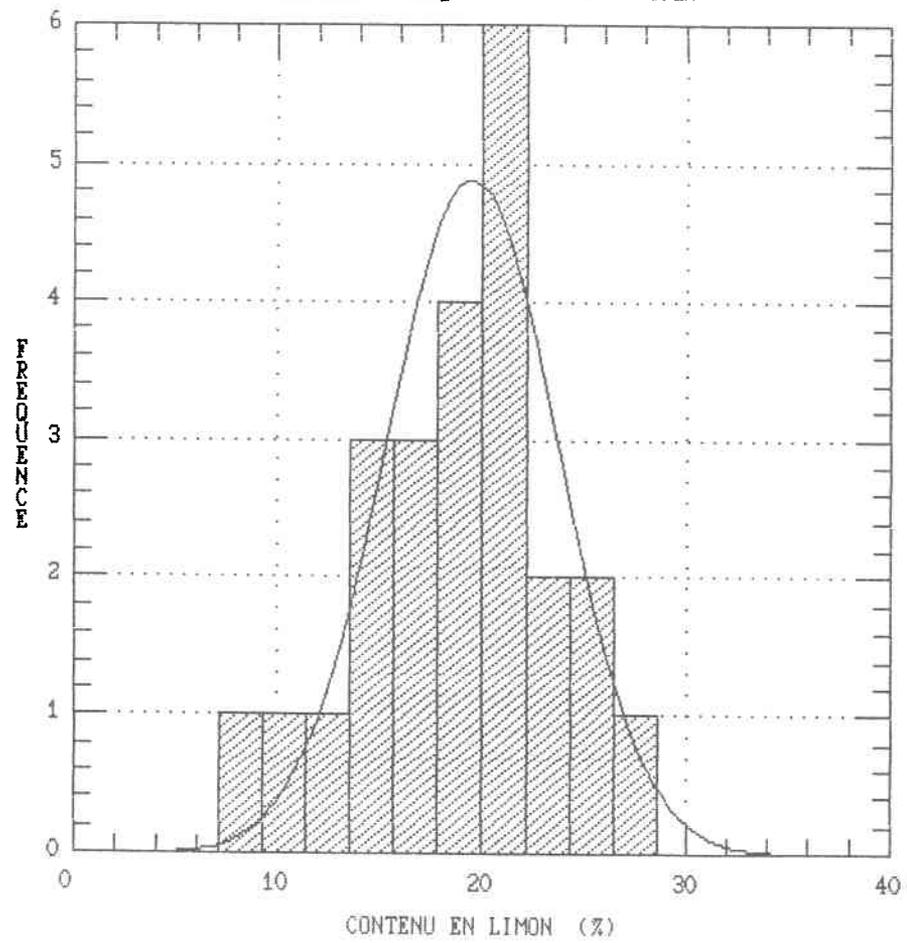
CONTENU EN LIMON ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 24.7% e-t: 1.2%



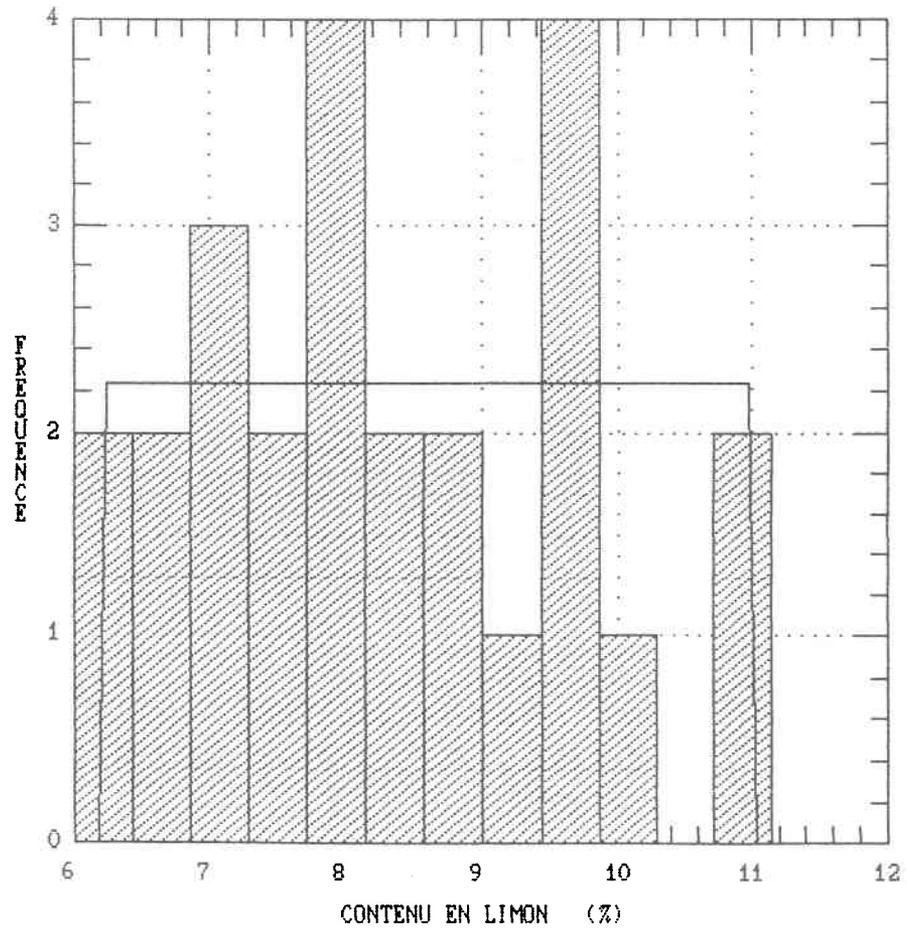
CONTENU EN LIMON ST-AUGUSTIN (B)
UNIFORME B.1: 19.0% B.S: 31.2%



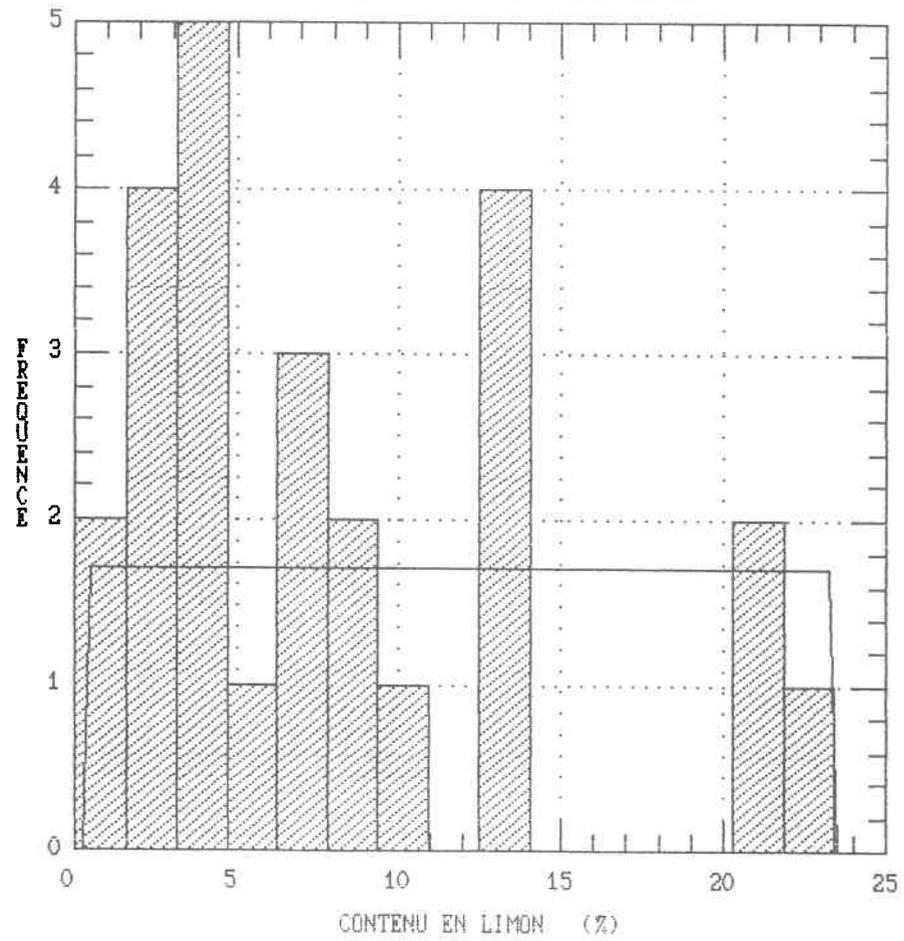
CONTENU EN LIMON ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 19.5% e-t: 4.2%



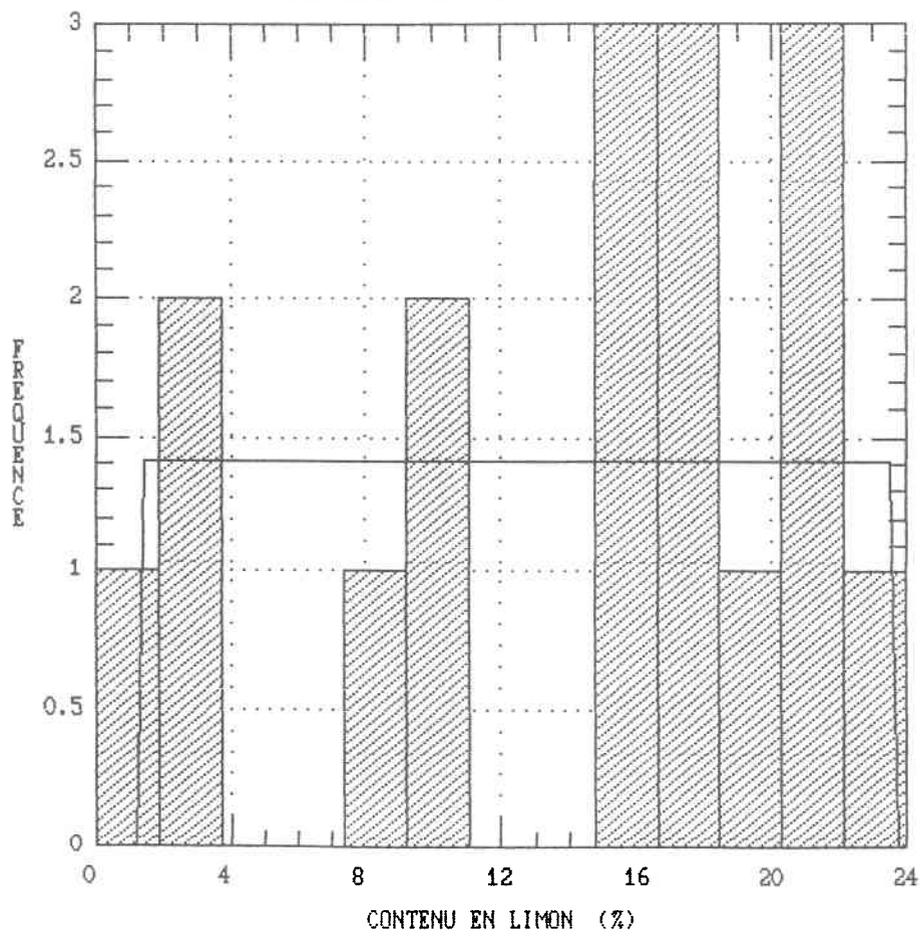
CONTENU EN LIMON L'ASSOMPTION (A)
 UNIFORME B.I: 6.2% B.S: 11.0%



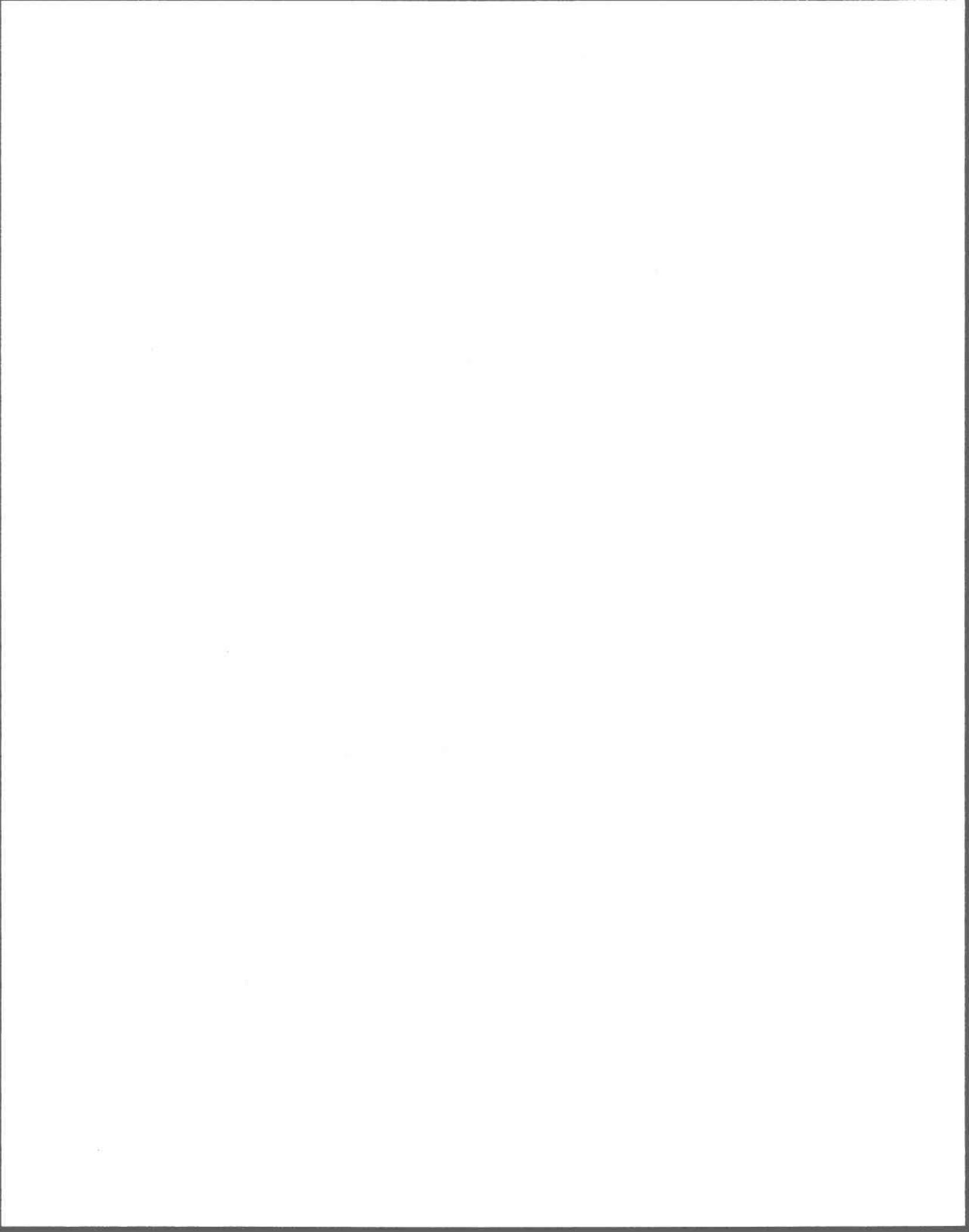
CONTENU EN LIMON L'ASSOMPTION (B)
UNIFORME B.I: 0.4% B.S: 23.4%



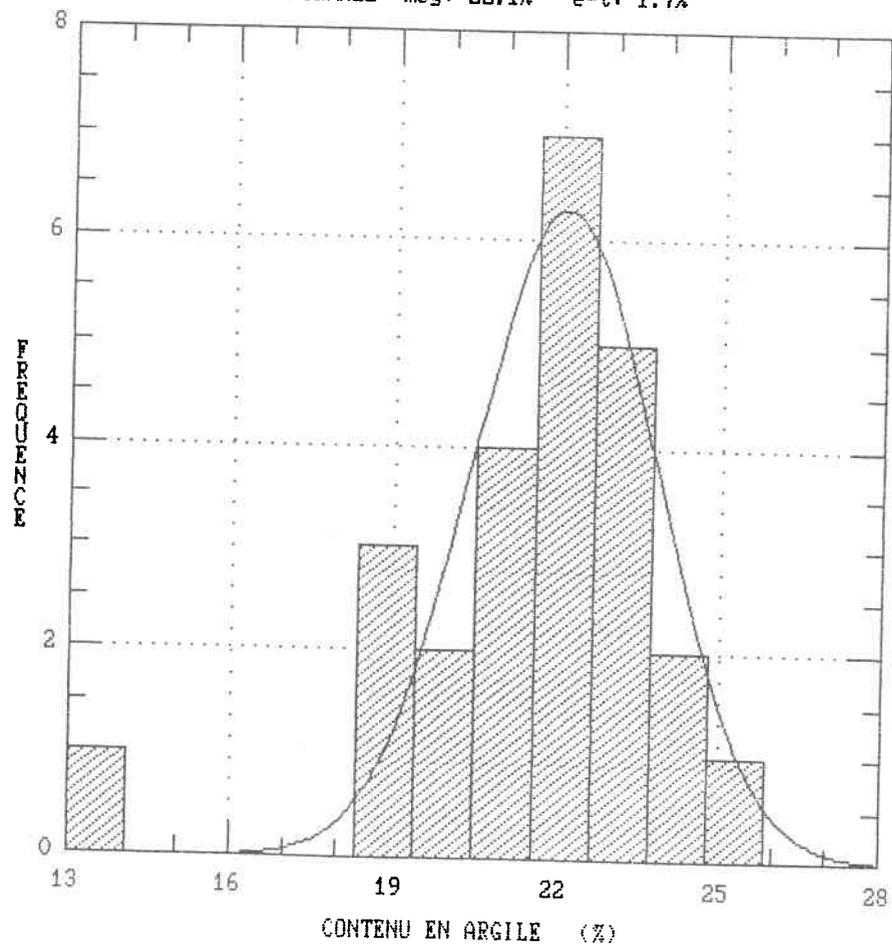
CONTENU EN LIMON L'ASSOMPTION (C)
 UNIFORME B.I: 1.3% B.S: 23.6%



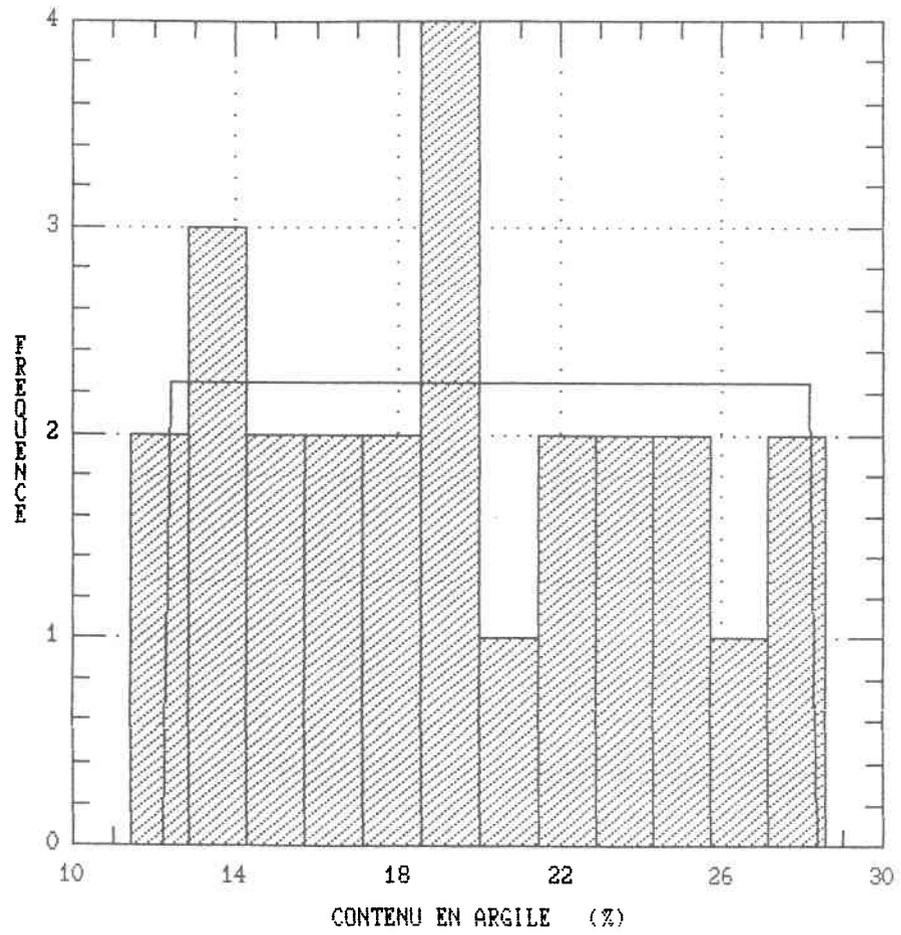
Contenu en argile



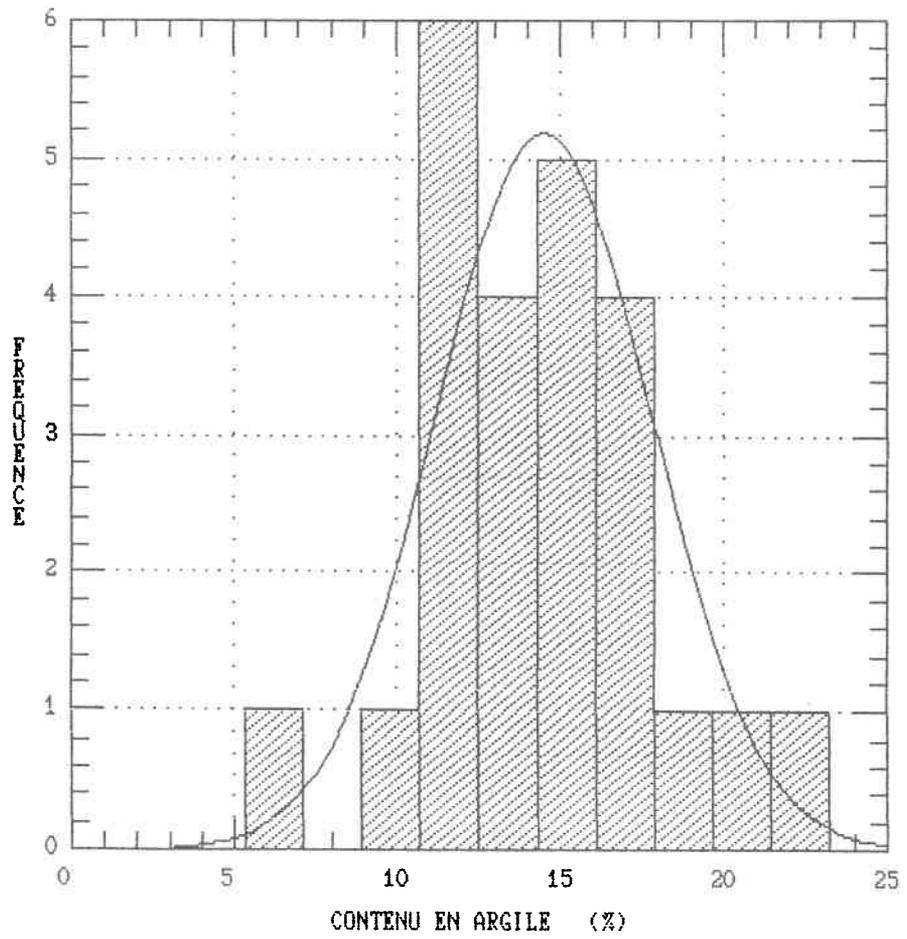
CONTENU EN ARGILE ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 22.1% e-t: 1.7%



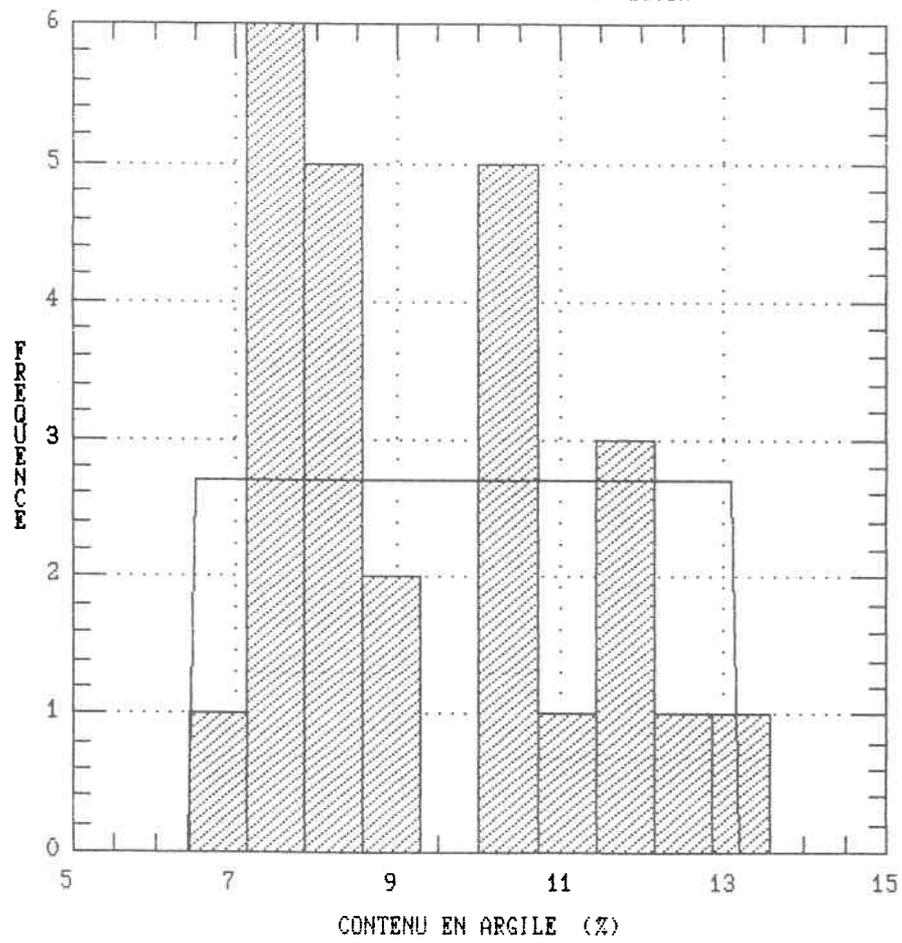
CONTENU EN ARGILE ST-AUGUSTIN (B)
UNIFORME B.I: 12.3% B.S: 28.2%



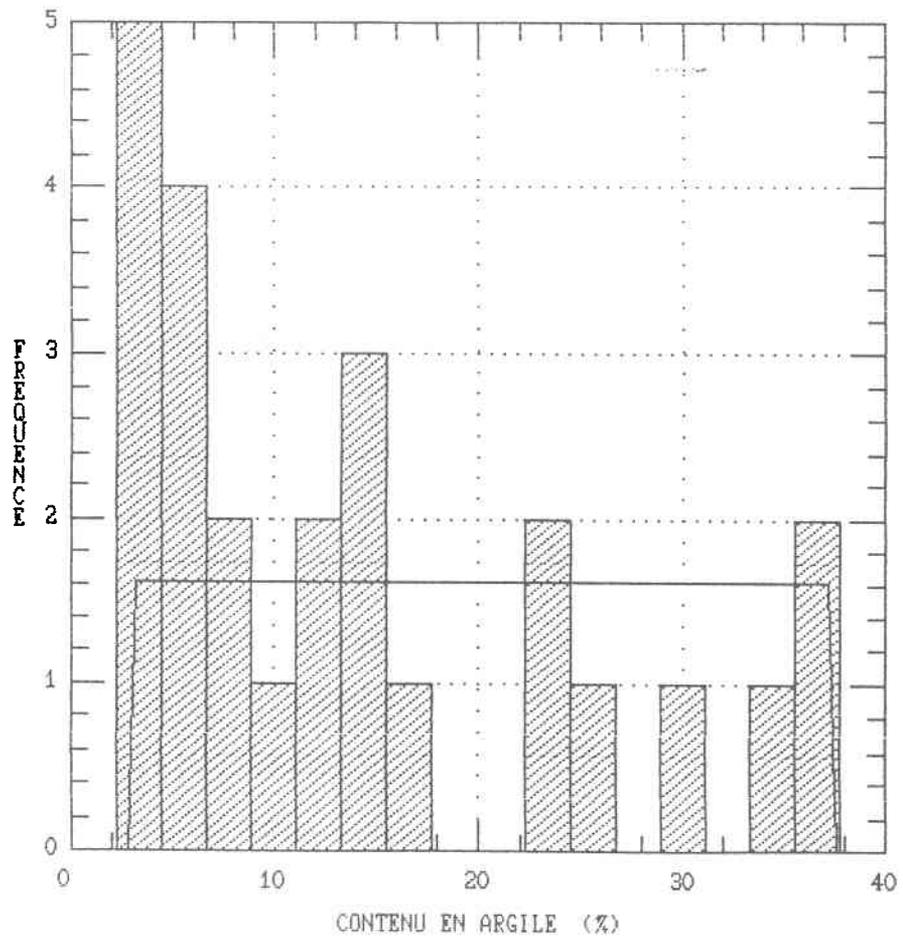
CONTENU EN ARGILE ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 14.5% e-t: 3.3%



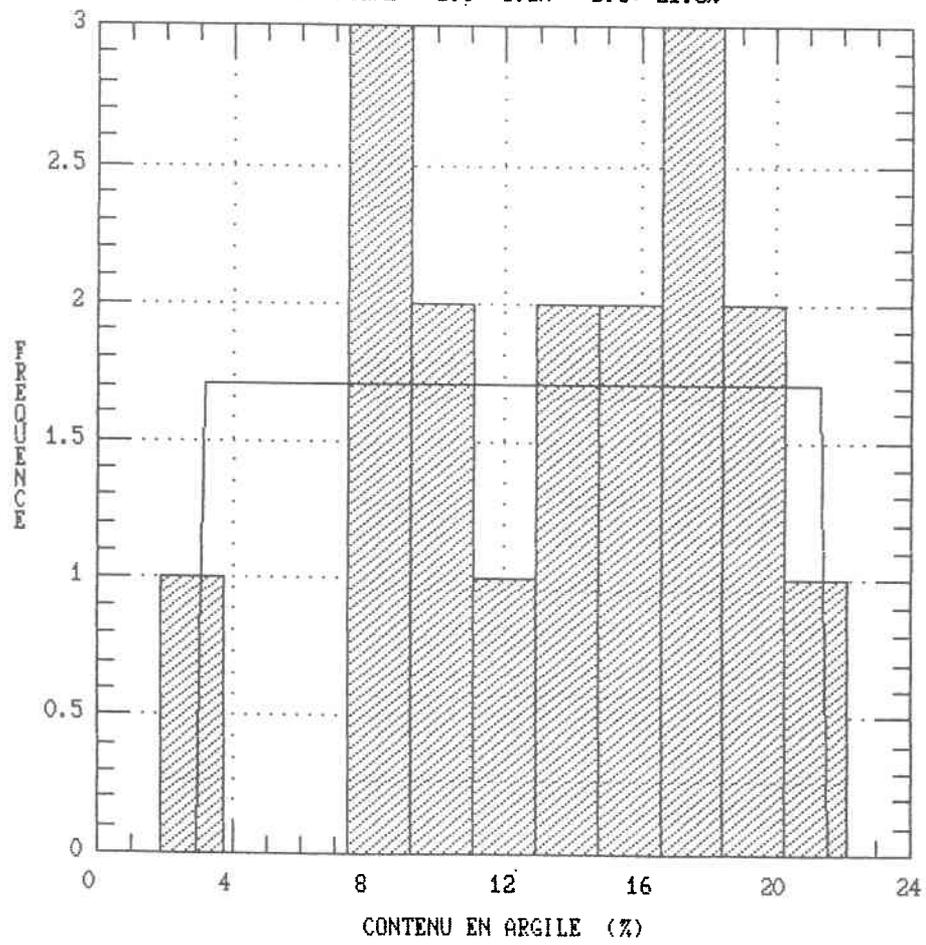
CONTENU EN ARGILE L'ASSOMPTION (A)
 UNIFORME B.I: 6.5% B.S: 13.1%



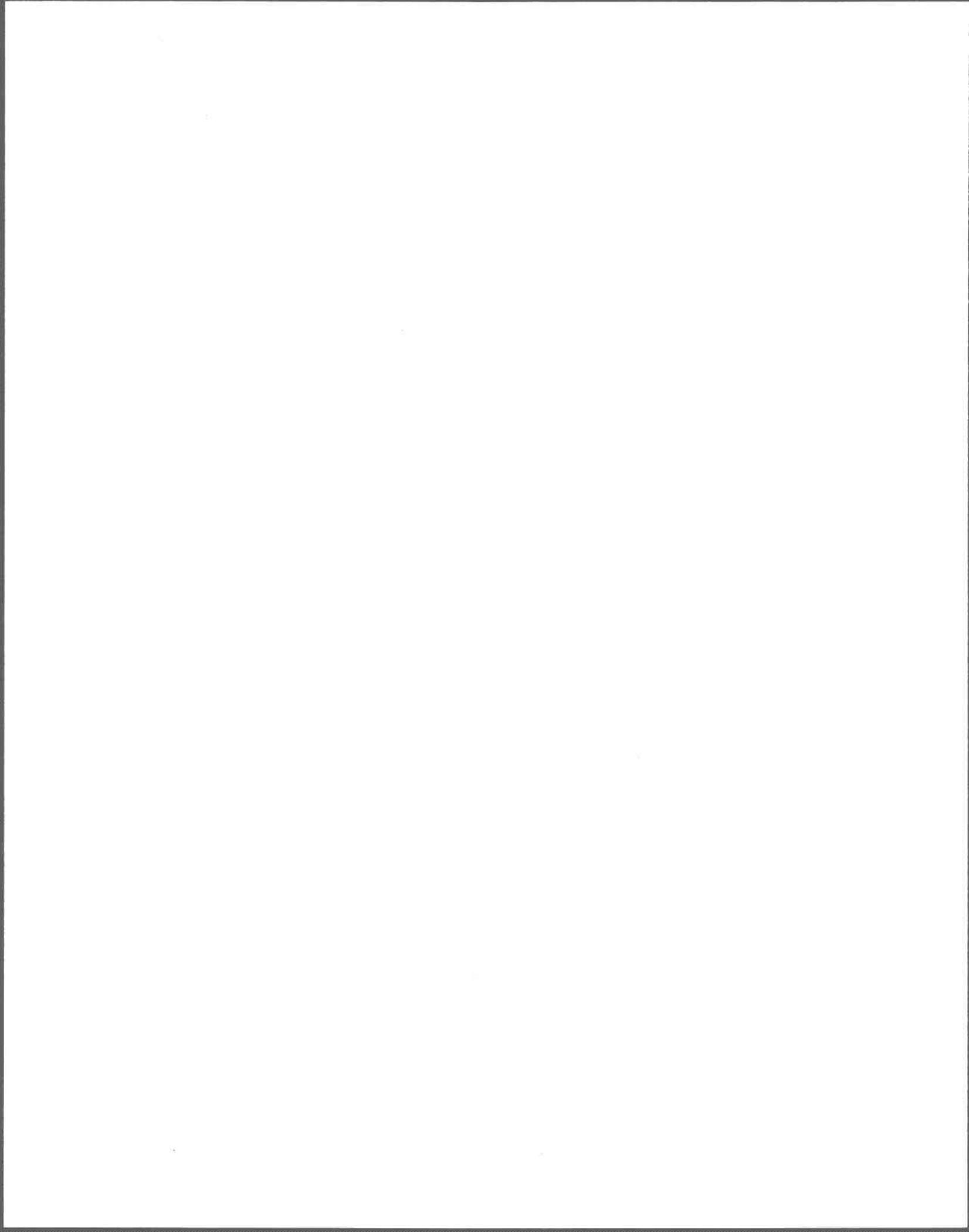
CONTENU EN ARGILE L'ASSOMPTION (B)
 UNIFORME B.I: 3.0% B.S: 37.4%



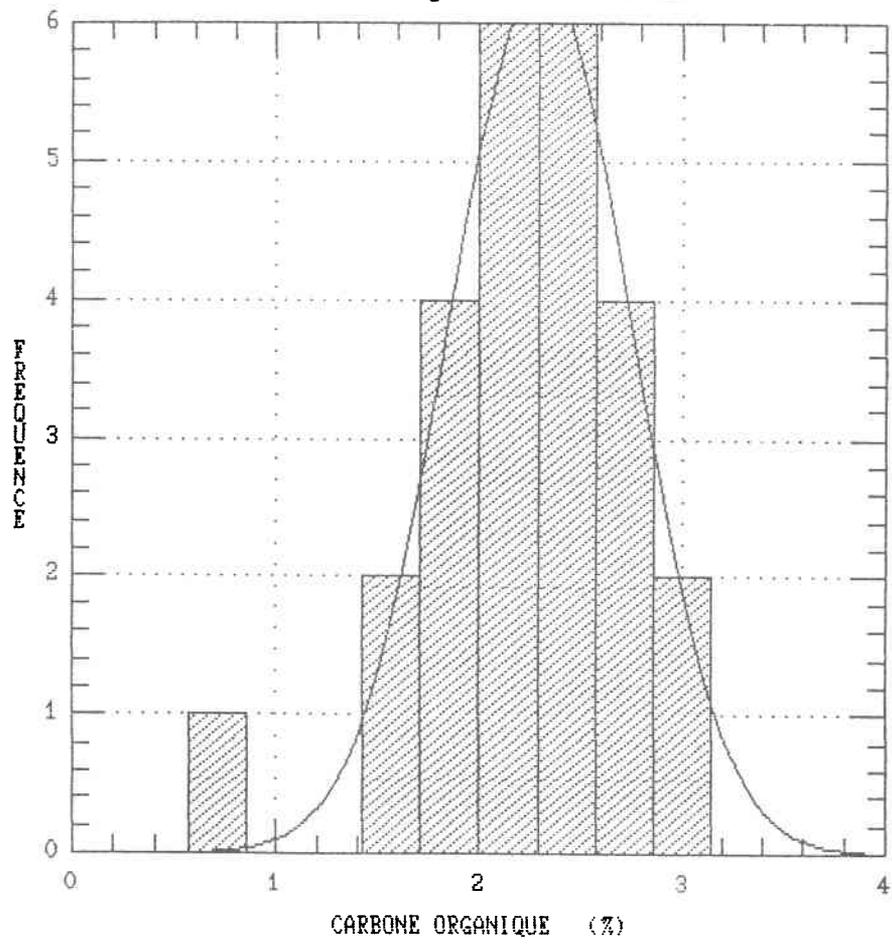
CONTENU EN ARGILE L'ASSOMPTION (C)
 UNIFORME B.I: 3.1% B.S: 21.5%



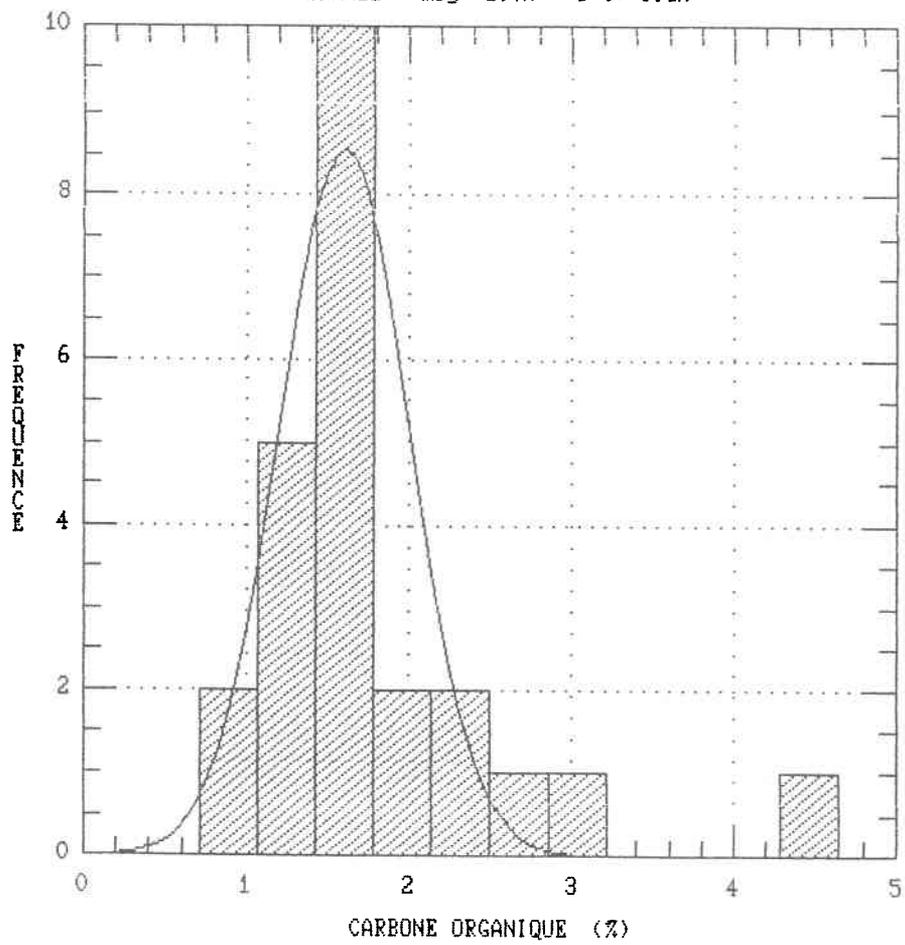
Carbone organique



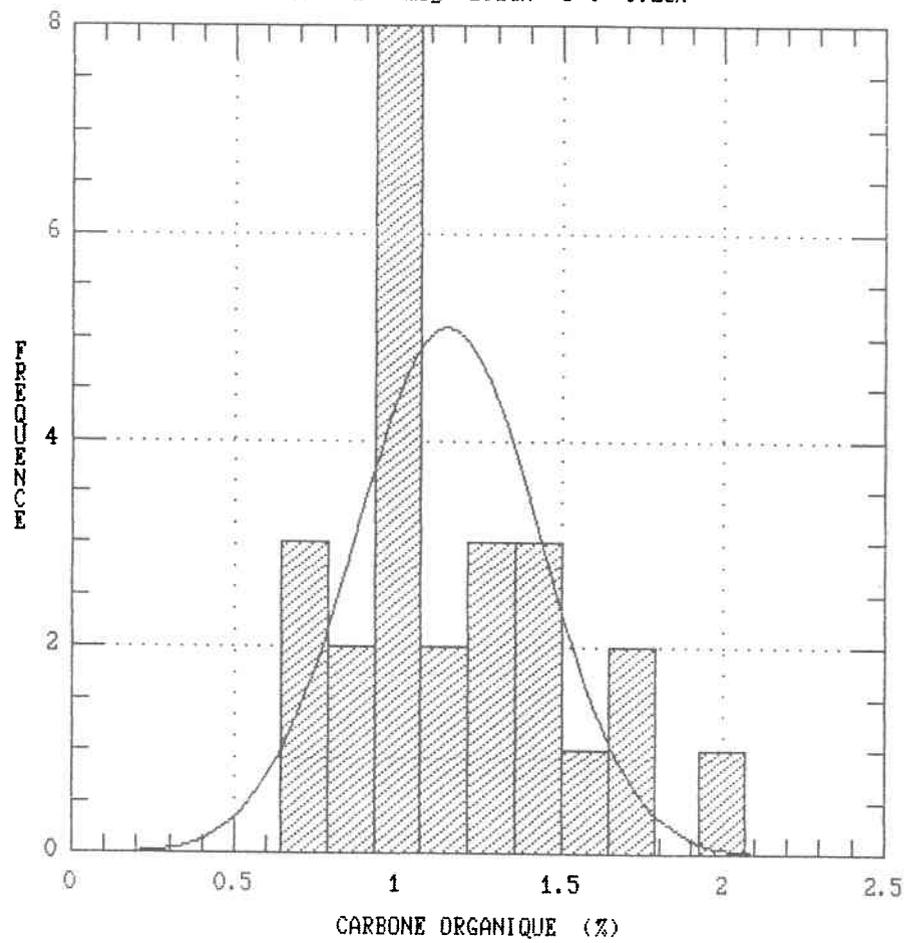
CARBONE ORGANIQUE ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 2.3% e-t: 0.45%



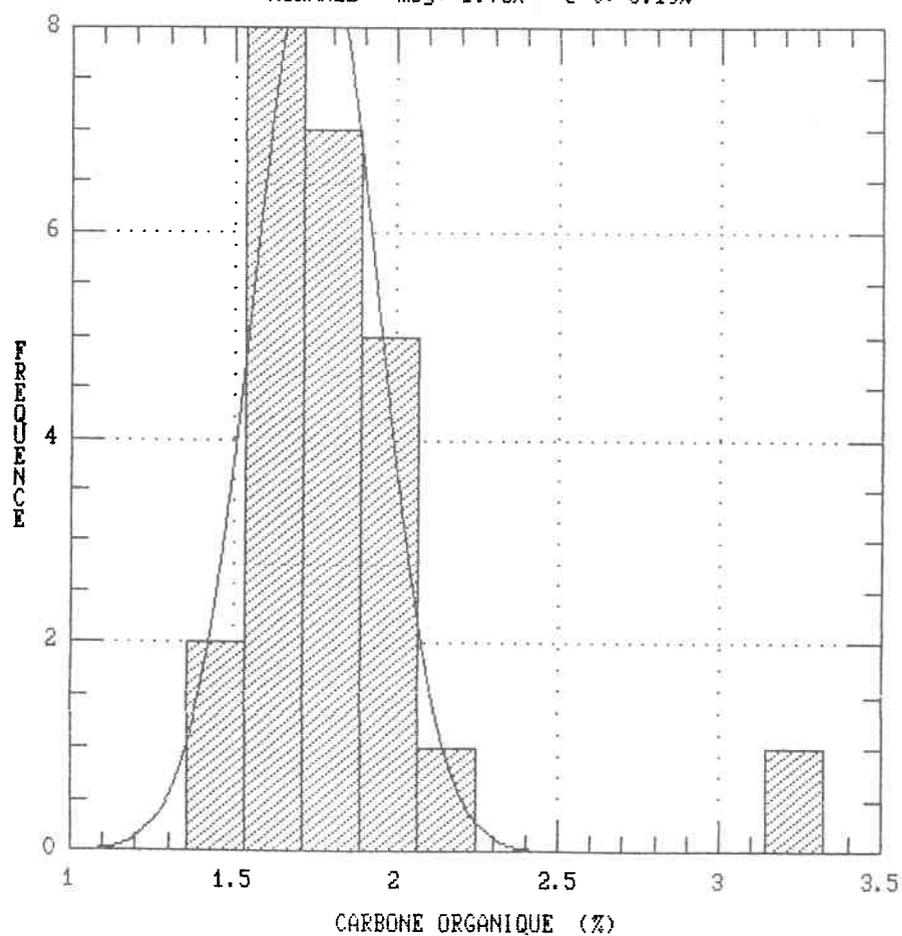
CARBONE ORGANIQUE ST-AUGUSTIN (B)
NORMALE moy: 1.7% e-t: 0.6%



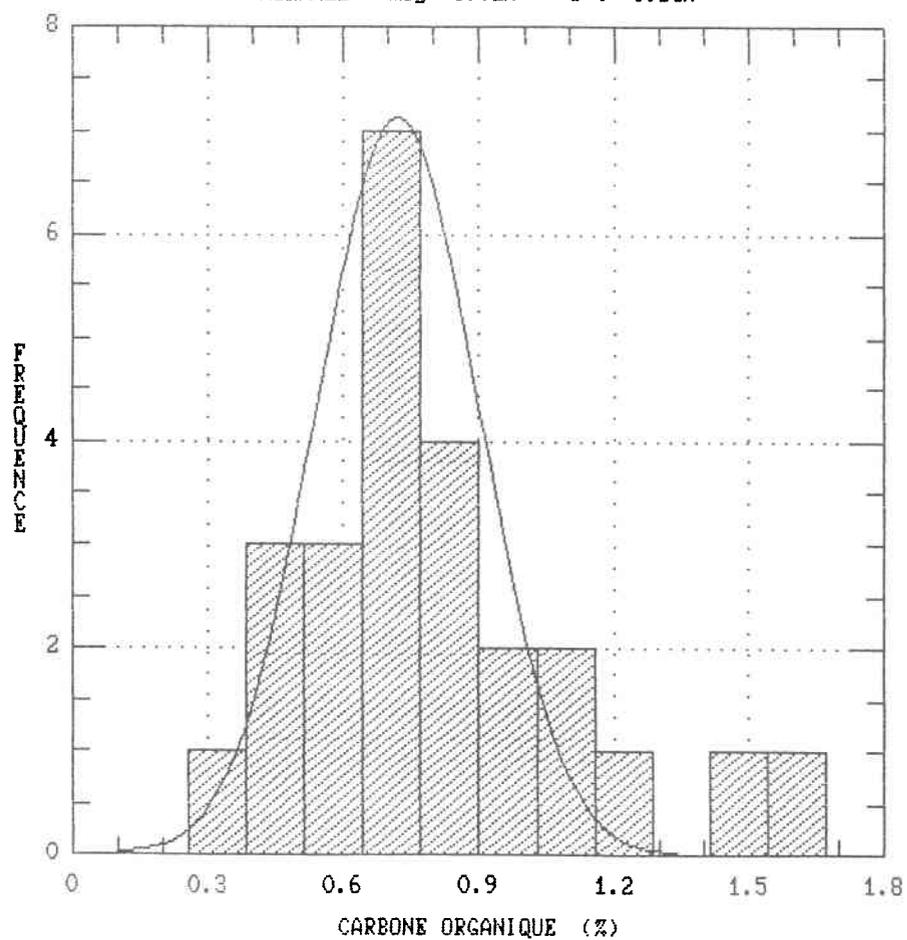
CARBONE ORGANIQUE ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 1.15% e-t: 0.28%



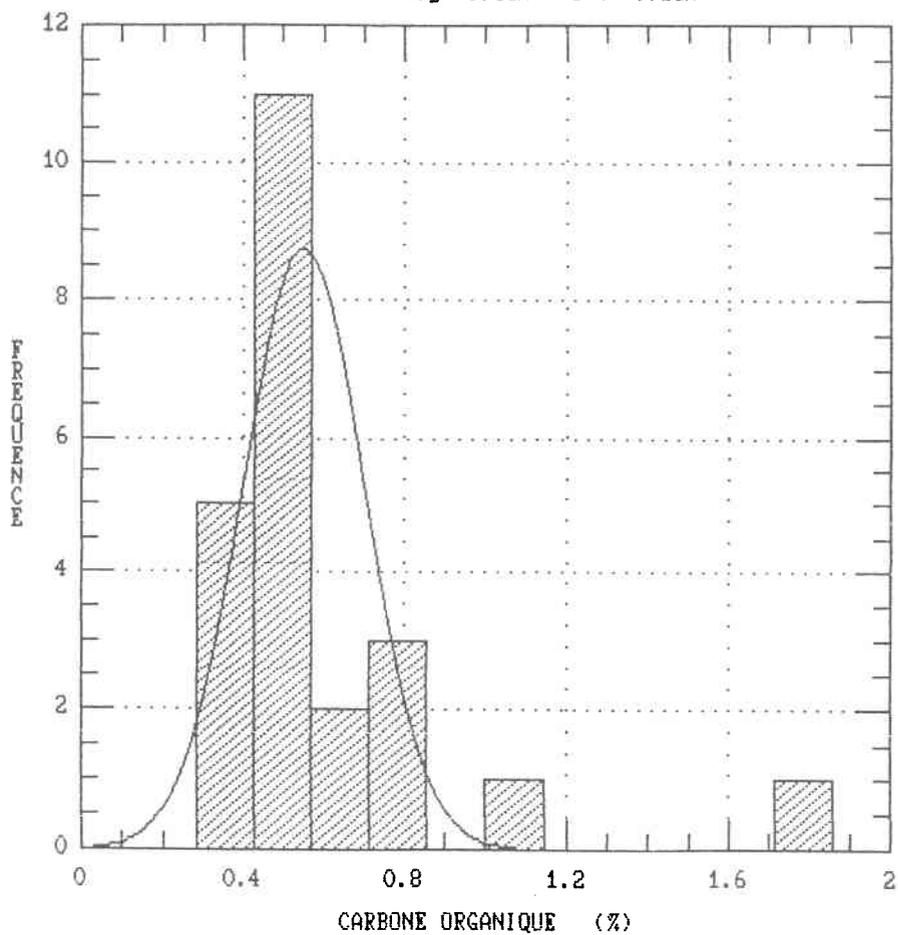
CARBONE ORGANIQUE L'ASSOMPTION (A)
NORMALE moy: 1.75% e-t: 0.19%



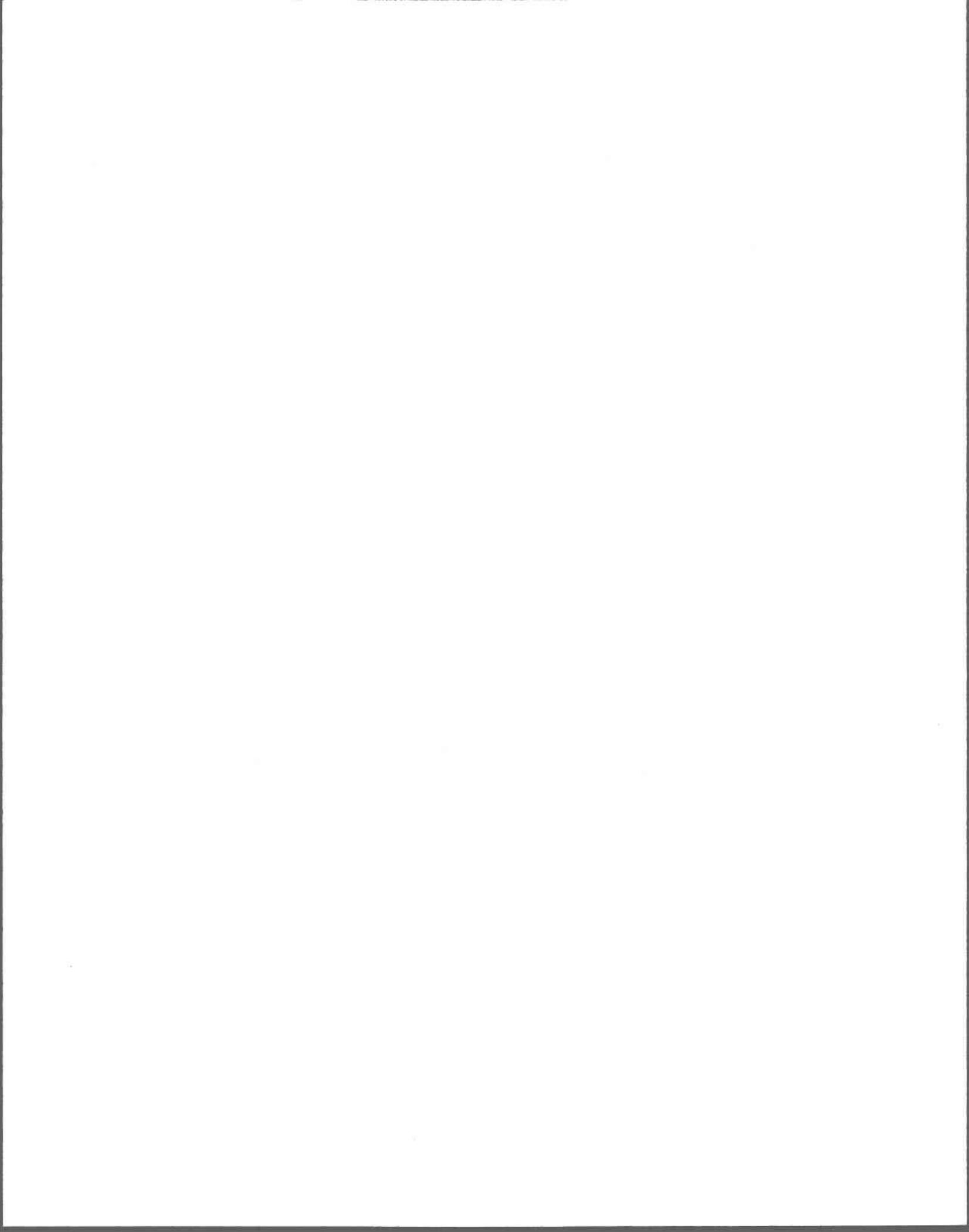
CARBONE ORGANIQUE L'ASSOMPTION (B)
NORMALE moy: 0.72% e-t: 0.18%



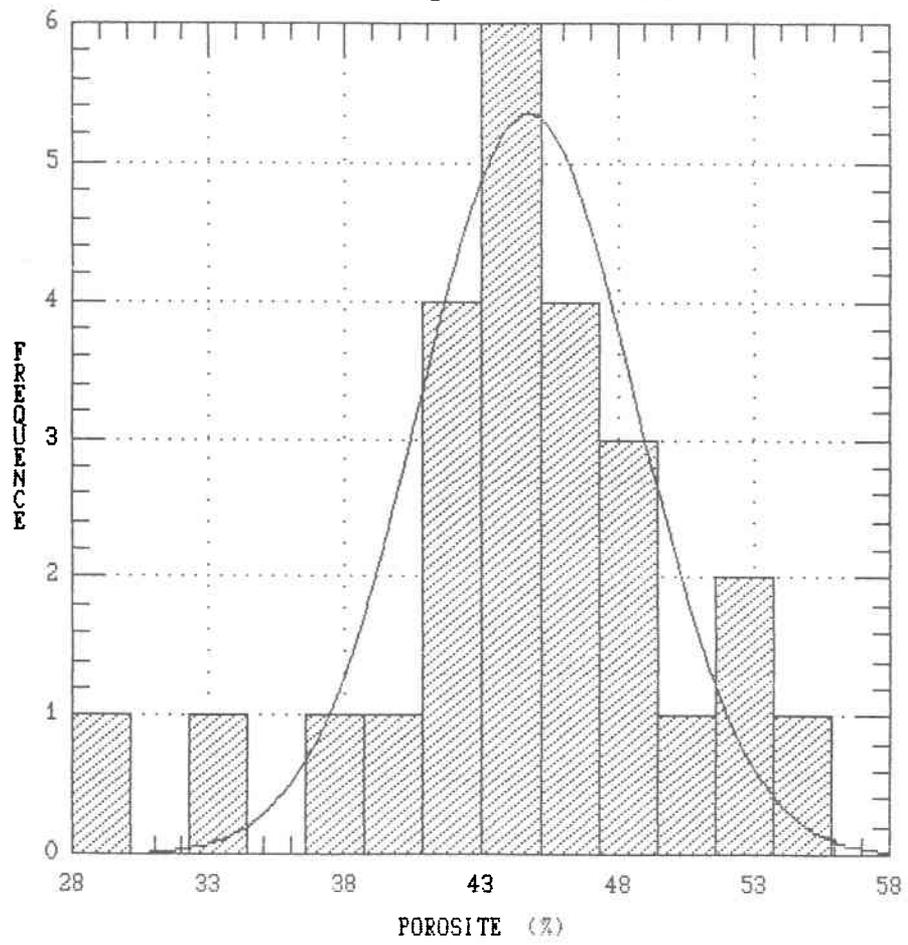
CARBONE ORGANIQUE L'ASSOMPTION (C)
NORMALE moy: 0.55% e-t: 0.15%



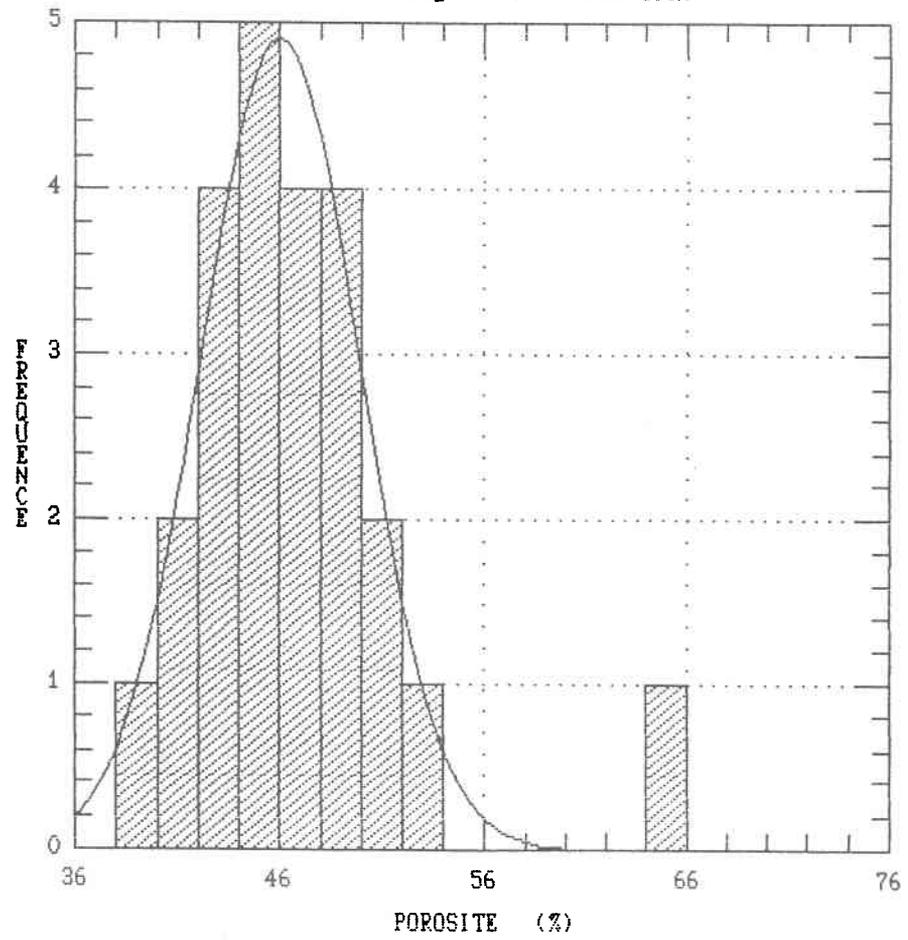
Porosité



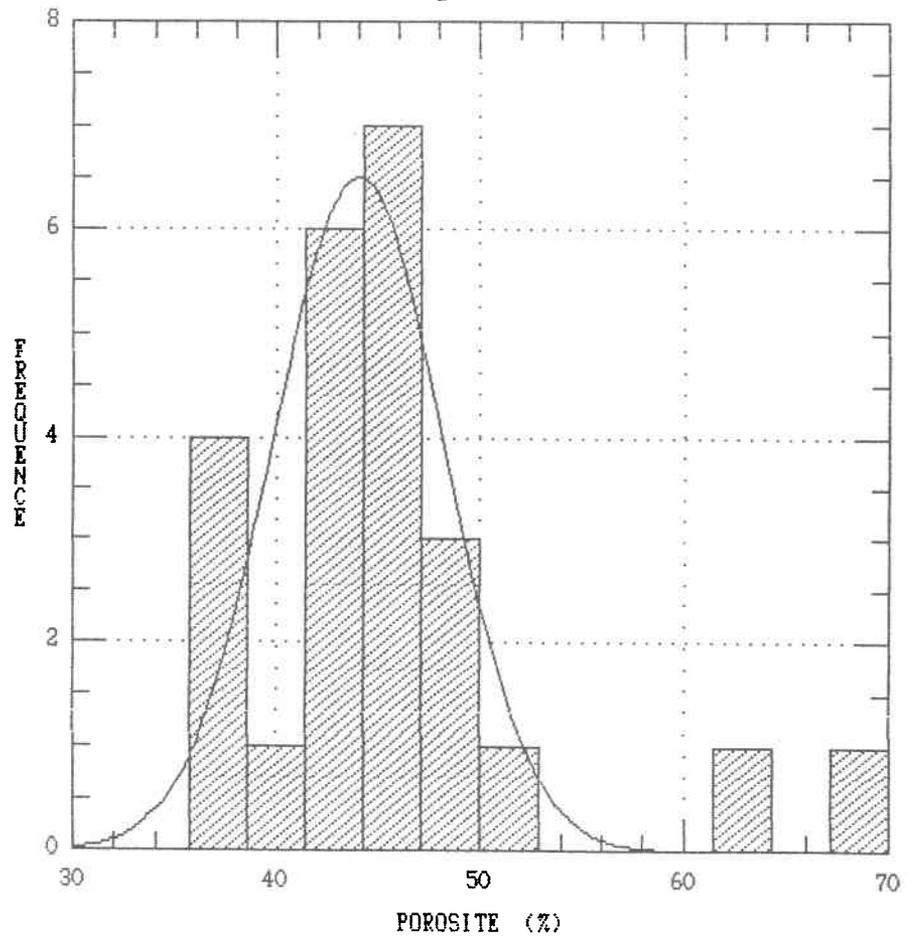
POROSITE ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 44.7% e-t: 4.0%



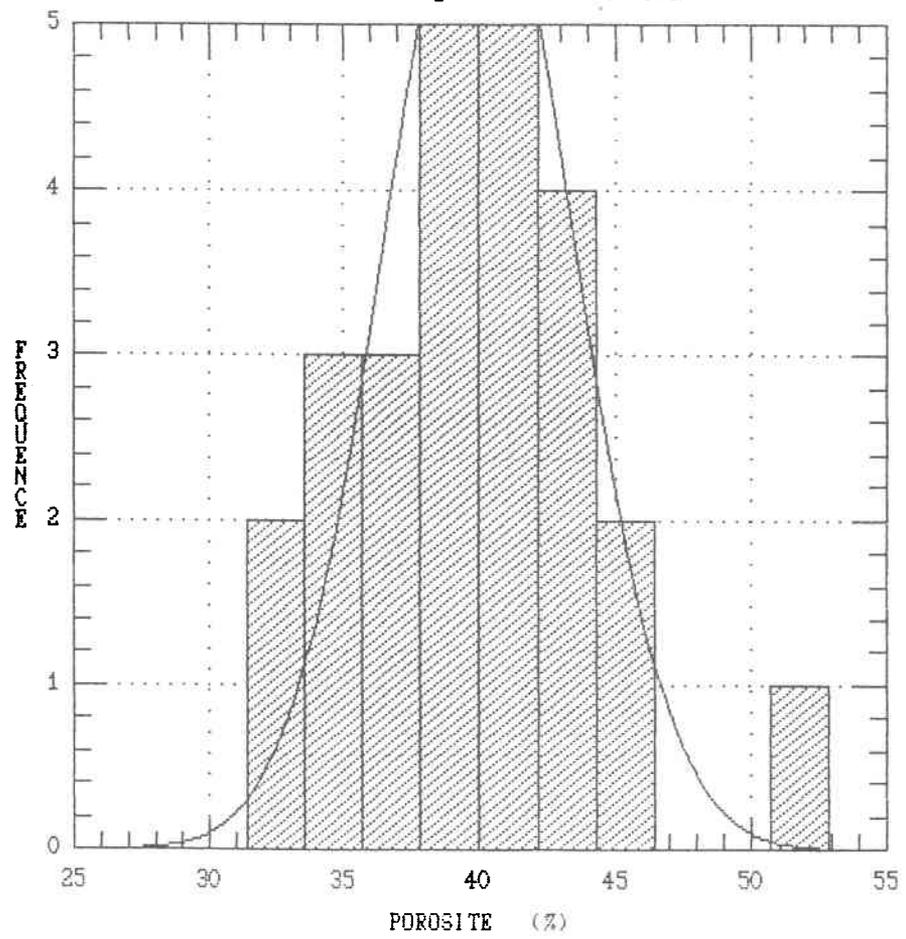
POROSITE ST-AUGUSTIN (B)
NORMALE moy: 46.0% e-t: 3.9%



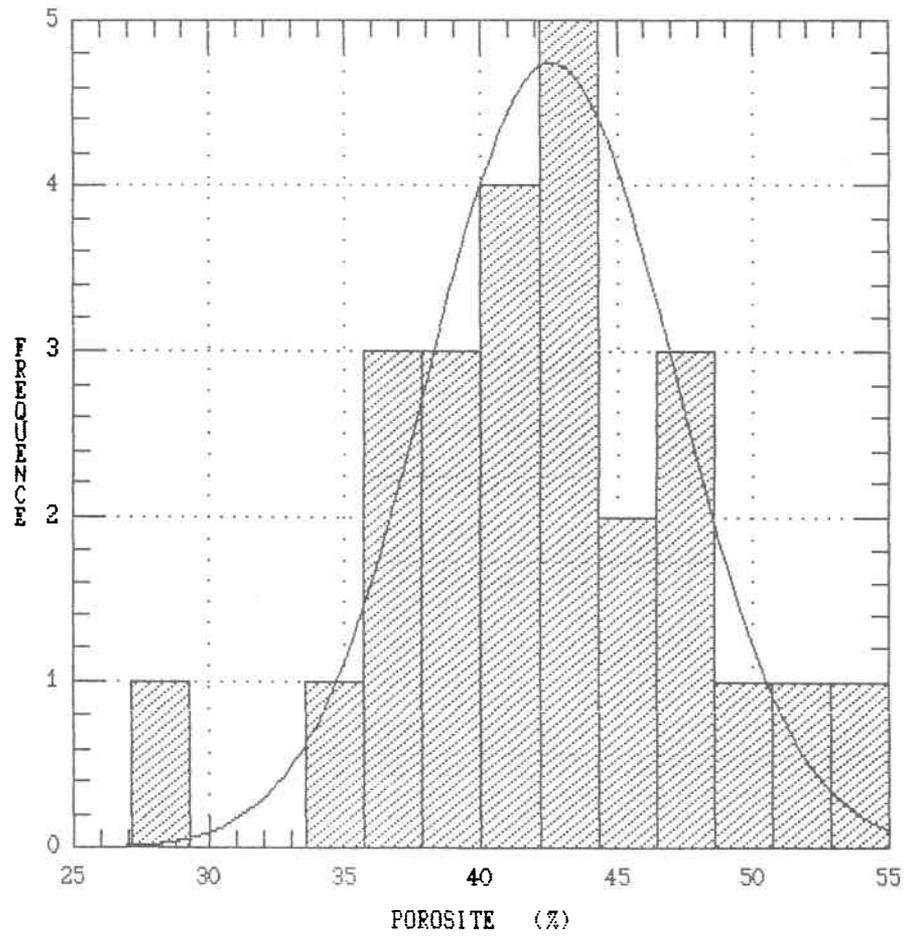
POROSITE ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 44.0% e-t: 4.2%



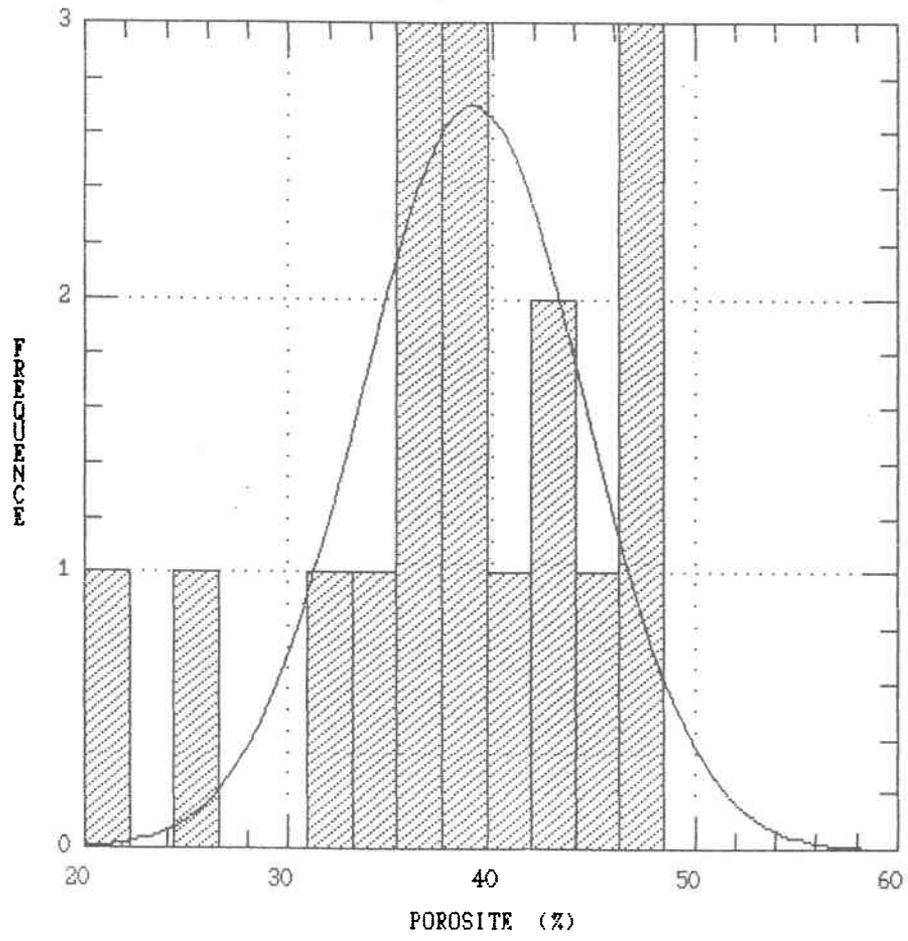
POROSITE L'ASSOMPTION (A)
NORMALE moy: 40.0% e-t: 3.5%



POROSITE L'ASSOMPTION (B)
NORMALE moy: 42.6% e-t: 4.5%



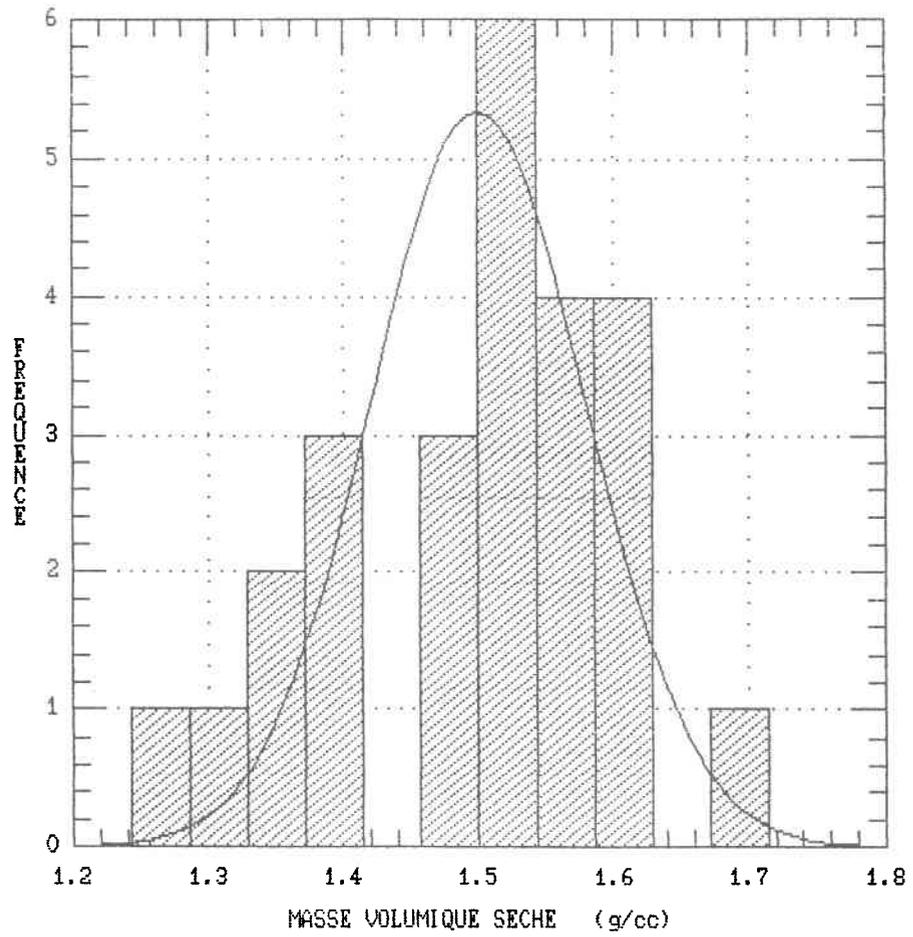
POROSITE L'ASSOMPTION (C)
NORMALE moy: 39.0% e-t: 5.5%



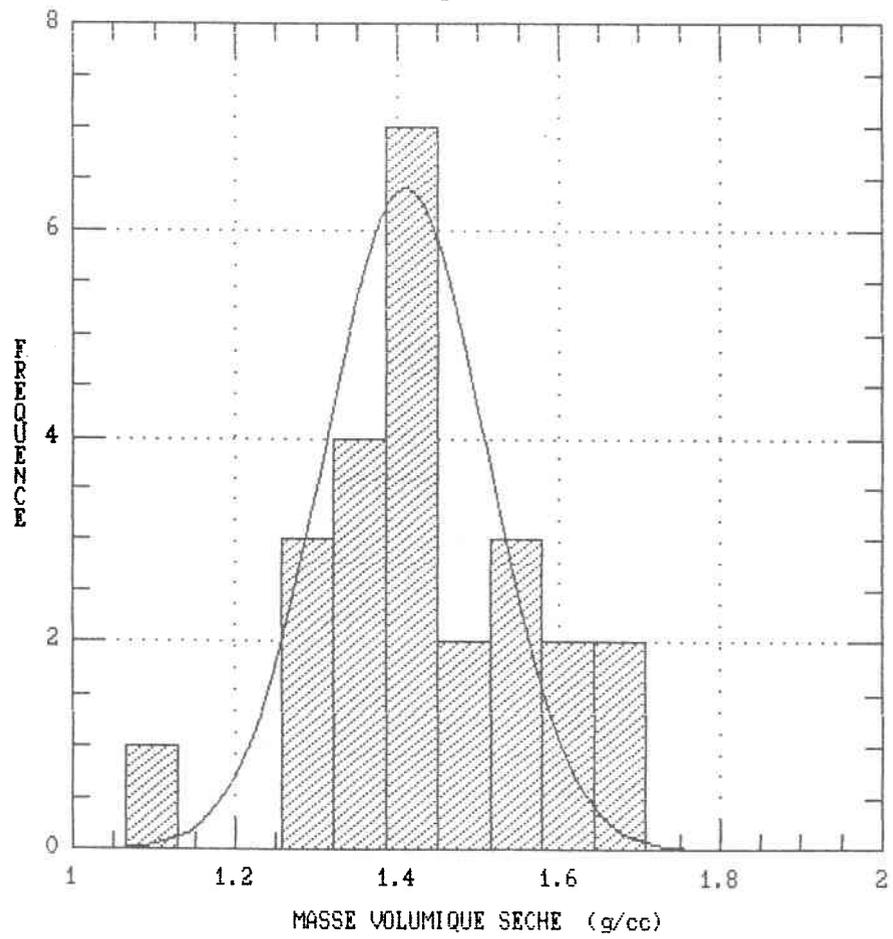
Masse volumique seche



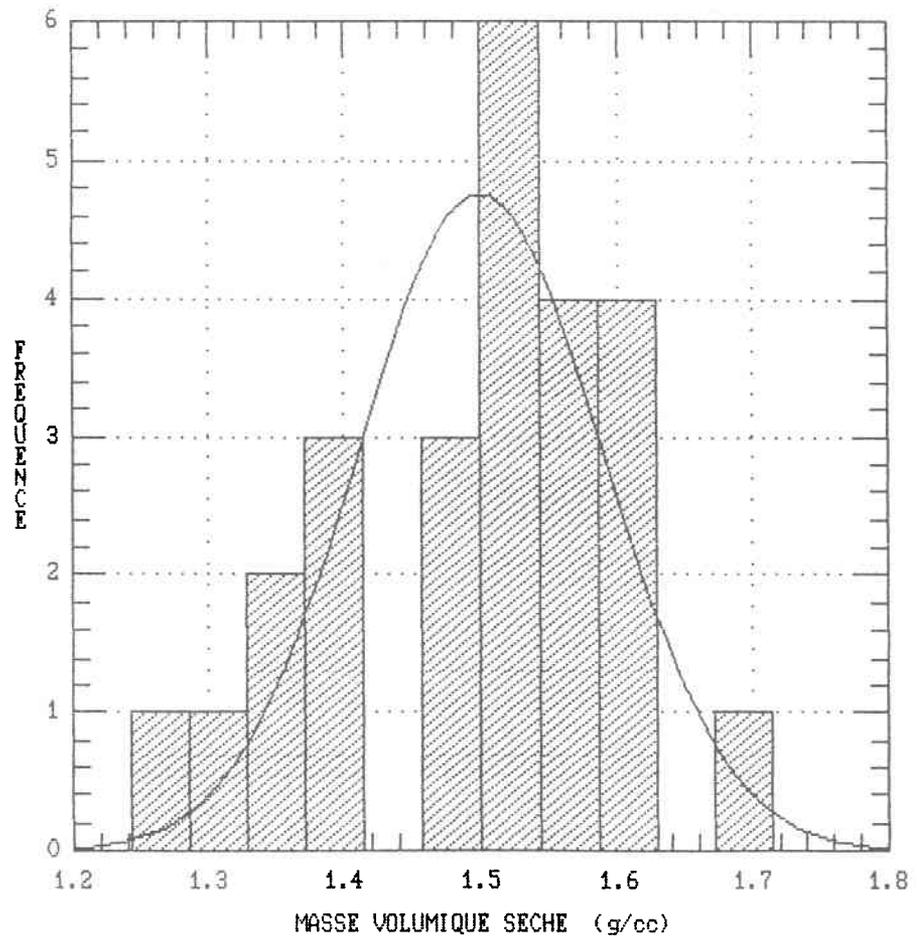
MASSE VOLUMIQUE SECHE ST-AUGUSTIN (A)
NORMALE moy: 1.50 e-t: 0.08



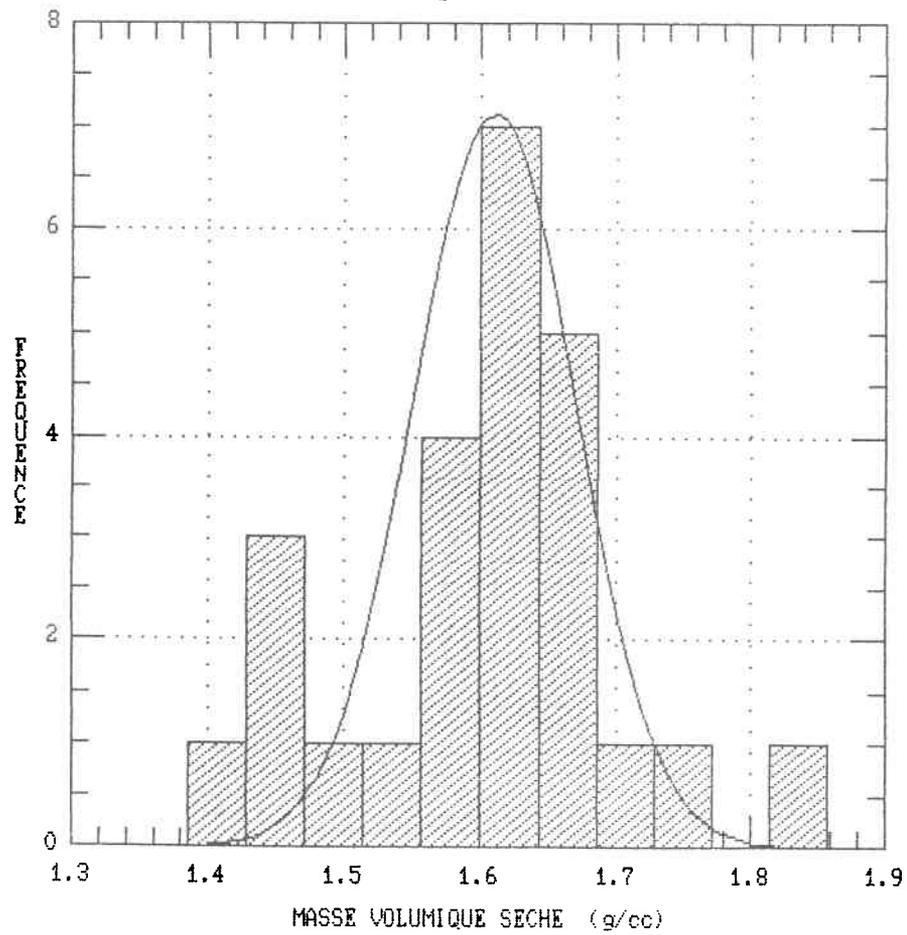
MASSE VOLUMIQUE SECHE ST-AUGUSTIN (B)
NORMALE moy: 1.41 e-t: 0.1



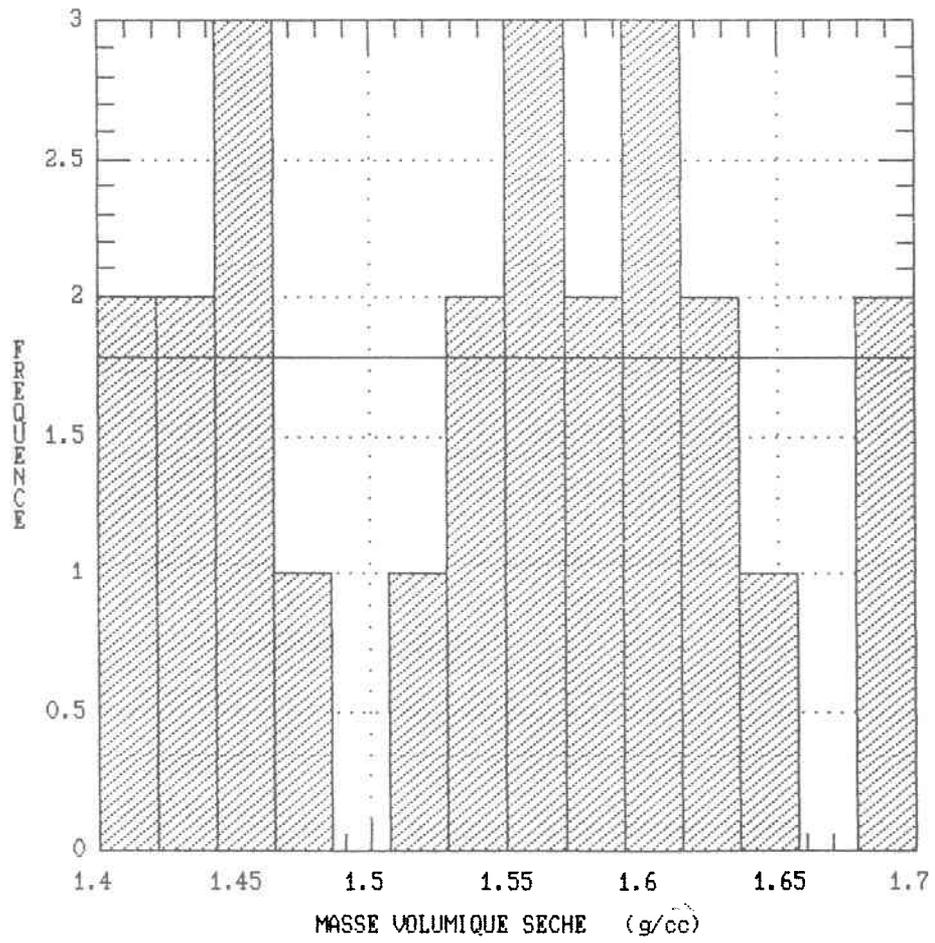
MASSE VOLUMIQUE SECHE ST-AUGUSTIN (C)
NORMALE moy: 1.50 e-t: 0.09



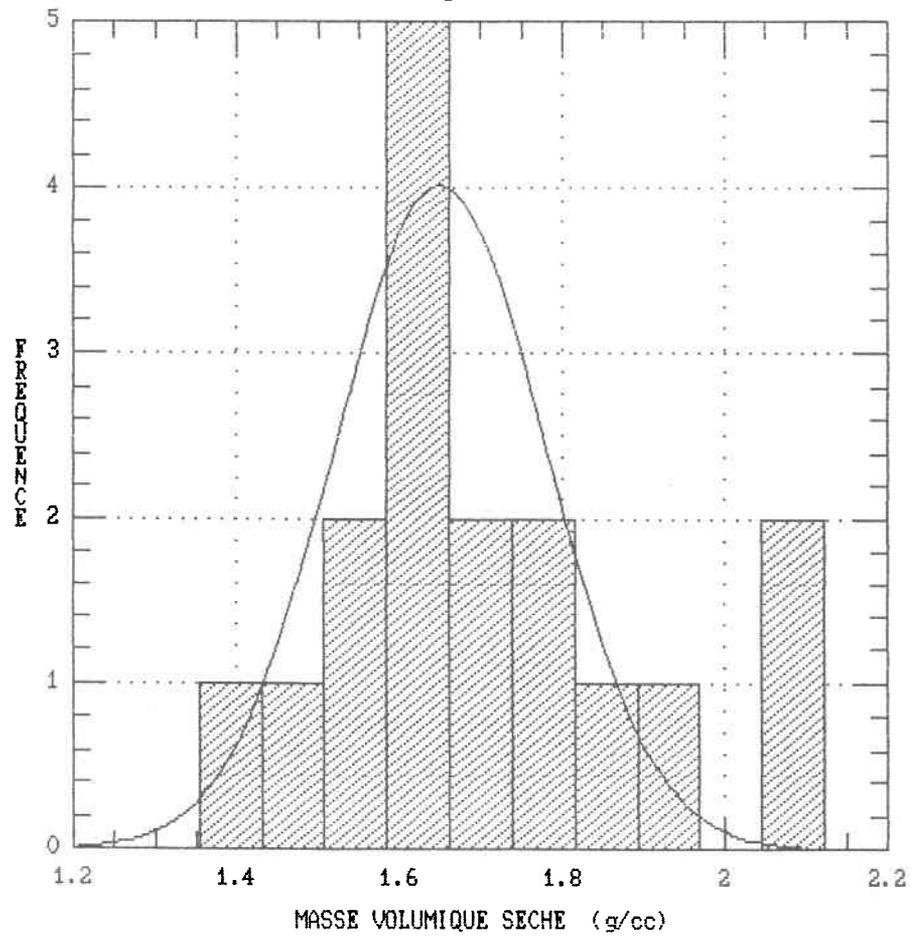
MASSE VOLUMIQUE SECHE L'ASSOMPTION (A)
NORMALE moy: 1.61 e-t: 0.06



MASSE VOLUMIQUE SECHE L'ASSOMPTION (B)
 UNIFORME B.I: 1.4 B.S: 1.7



MASSE VOLUMIQUE SECHE L'ASSOMPTION (C)
NORMALE moy: 1.65 e-t: 0.13



ANNEXE D

Corrélations par rangs de Kendall

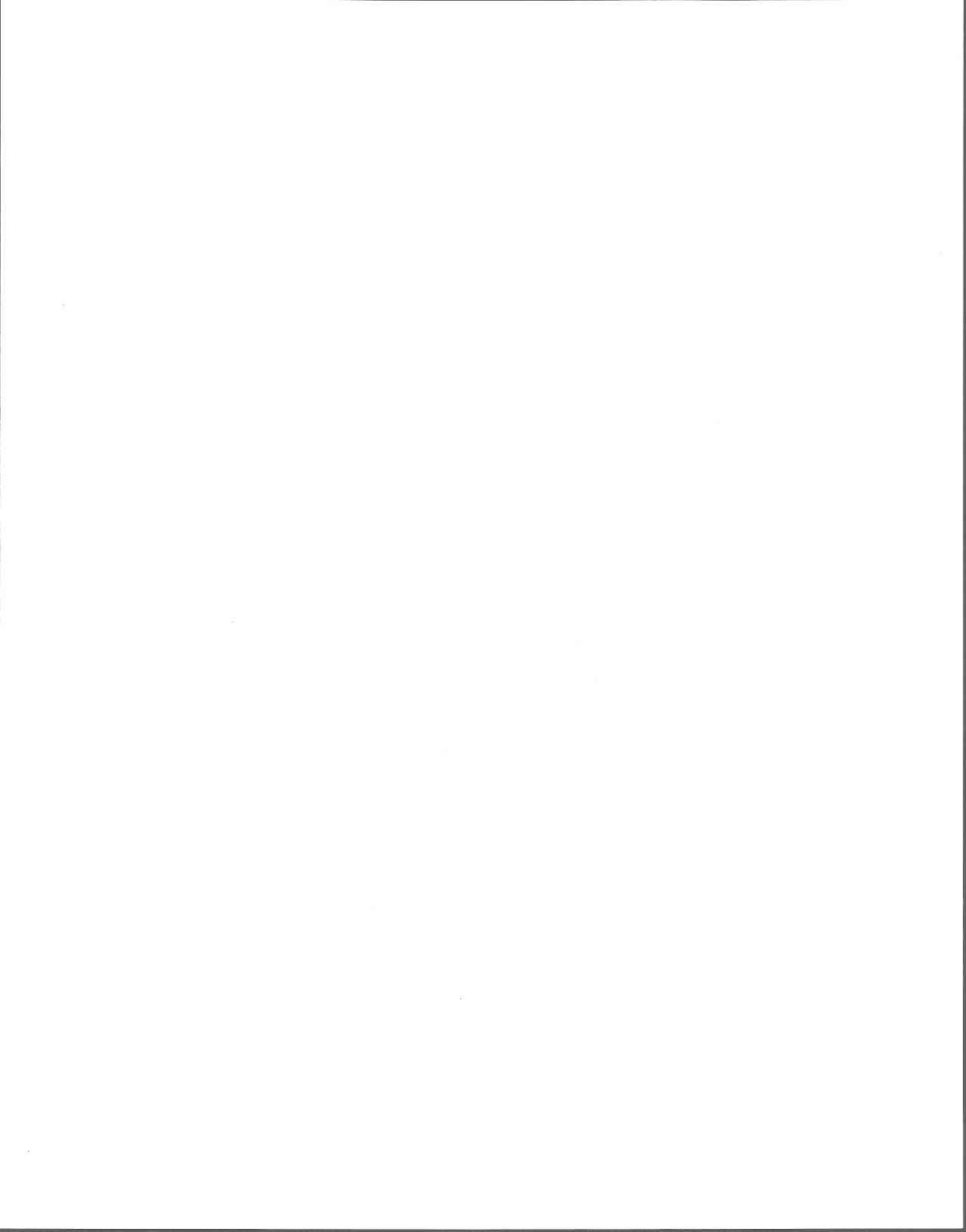


TABLEAU D-1

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "A" de Saint-Augustin

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (25) --						
SAB	-.0671 (25) 0.45	1.0000 (25) --					
LIM	-.1279 (25) 0.87	-.5387 (25) 3.75**	1.0000 (25) --				
ARG	.1487 (25) 1.02	-.5135 (25) 3.57**	.0407 (25) 0.26	1.0000 (25) --			
MVSEC	-.5270 (25) 3.67**	.1554 (25) 1.07	.0034 (25) 0.0	-.1156 (25) 0.79	1.0000 (25) --		
PORO	.3278 (25) 2.27*	-.1940 (25) 1.34	.0738 (25) 0.49	.1684 (25) 1.16	-.2694 (25) 1.86	1.0000 (25) --	
C-ORG	.2260 (25) 1.56	-.5835 (25) 4.06**	.1387 (25) 0.95	.8115 (25) 5.66**	-.2071 (25) 1.43	.2319 (25) 1.60	1.0000 (25) --

coefficient "r_K" \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

**: significatif à 1% de confiance

TABLEAU D-2

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "B" de Saint-Augustin

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (25) --						
SAB	.2170 (25) 1.50	1.0000 (25) --					
LIM	-.2408 (25) 1.66	-.5394 (25) 3.76**	1.0000 (25) --				
ARG	-.2371 (25) 1.64	-.7692 (25) 5.37**	.3049 (25) 2.11*	1.0000 (25) --			
MVSEC	-.2387 (25) 1.65	.1549 (25) 1.06	-.0101 (25) 0.05	-.1549 (25) 1.06	1.0000 (25) --		
PORO	.1851 (25) 1.27	-.1455 (25) 1.00	.1018 (25) 0.69	.1455 (25) 1.00	-.1539 (25) 1.05	1.0000 (24) --	
C-ORG	.1594 (25) 1.09	-.4465 (25) 3.11**	.2109 (25) 1.45	.4537 (25) 3.16**	-.3839 (25) 2.66**	.1743 (24) 1.17	1.0000 (24) --

coefficient " r_k " \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

** : significatif à 1% de confiance

TABLEAU D-3

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "C" de Saint-Augustin

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (24) --						
SAB	.2255 (24) 1.52	1.0000 (24) --					
LIM	-.0984 (24) 0.65	-.7151 (24) 4.87**	1.0000 (24) --				
ARG	-.1639 (24) 1.10	-.4973 (24) 3.38**	.2109 (24) 1.42	1.0000 (24) --			
MVSEC	-.1872 (24) 1.26	.1426 (24) 0.95	-.0073 (24) 0.03	-.4396 (24) 2.98**	1.0000 (24) --		
PORO	.0765 (24) 0.50	-.1125 (24) 0.75	.0509 (24) 0.32	.1309 (24) 0.87	-.4029 (24) 2.73**	1.0000 (24) --	
C-ORG	-.2077 (24) 1.40	-.2359 (24) 1.59	.0873 (24) 0.57	.2255 (24) 1.52	-.0586 (24) 0.38	.1818 (24) 1.22	1.0000 (25) --

coefficient " r_k " \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

**: significatif à 1% de confiance

TABLEAU D-4

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "A" de l'Assomption

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (25) --						
SAB	.0000 (25) 0.0	1.0000 (25) --					
LIM	-.1252 (25) 0.85	-.5094 (25) 3.55**	1.0000 (25) --				
ARG	.0169 (25) 1.00	-.6735 (25) 4.70**	.1649 (25) 1.13	1.0000 (25) --			
MVSEC	-.5899 (25) 4.11**	-.0856 (25) 0.58	.0895 (25) 0.60	.0688 (25) 0.46	1.0000 (25) --		
PORO	.4174 (25) 2.90**	.0169 (25) 0.10	-.0373 (25) 0.24	-.1017 (25) 0.69	-.3973 (25) 2.76**	1.0000 (25) --	
C-ORG	.2142 (25) 1.48	-.3707 (25) 2.57*	.3838 (25) 2.66**	.2067 (25) 1.42	-.1363 (25) 0.93	.0655 (25) 0.44	1.0000 (24) --

coefficient " r_k " \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

**: significatif à 1% de confiance

TABLEAU D-5

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "B" de l'Assomption

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (25) --						
SAB	.6064 (25) 4.23**	1.0000 (25) --					
LIM	-.5175 (25) 3.60**	-.8591 (25) 6.00**	1.0000 (25) --				
ARG	-.5933 (25) 4.13**	-.9146 (25) 6.38**	.7646 (25) 5.33**	1.0000 (25) --			
MVSEC	.1275 (25) 0.87	.3339 (25) 2.32*	-.3126 (25) 2.17*	-.3087 (25) 2.14*	1.0000 (25) --		
PORO	-.3105 (25) 2.15*	-.3960 (25) 2.75**	.3478 (25) 2.41*	.4107 (25) 2.85**	-.3059 (25) 2.12*	1.0000 (25) --	
C-ORG	-.4523 (25) 3.15**	-.4848 (25) 3.37**	.4765 (25) 3.32**	.4322 (25) 3.00**	-.3035 (25) 2.10*	.2013 (25) 1.39	1.0000 (25) --

coefficient " r_k " \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

** : significatif à 1% de confiance

TABLEAU D-6

Corrélations par rangs de Kendall
Horizon "C" de l'Assomption

	K	SAB	LIM	ARG	MVSEC	PORO	C-ORG
K	1.0000 (17) --						
SAB	.5882 (17) 3.25**	1.0000 (17) --					
LIM	-.5630 (17) 3.11**	-.8593 (17) 4.77**	1.0000 (17) --				
ARG	-.4853 (17) 2.68**	-.7500 (17) 4.16**	.6074 (17) 3.36**	1.0000 (17) --			
MVSEC	-.1912 (17) 1.03	.0147 (17) 0.04	-.0444 (17) 0.21	-.0588 (17) 0.29	1.0000 (17) --		
PORO	-.1324 (17) 0.70	-.2794 (17) 1.52	.2963 (17) 1.62	.3235 (17) 1.77	-.5000 (17) 2.76**	1.0000 (17) --	
C-ORG	-.1402 (17) 0.74	-.1550 (17) 0.83	.1561 (17) 0.83	.2288 (17) 1.24	-.1993 (17) 1.08	.1107 (17) 0.58	1.0000 (23) --

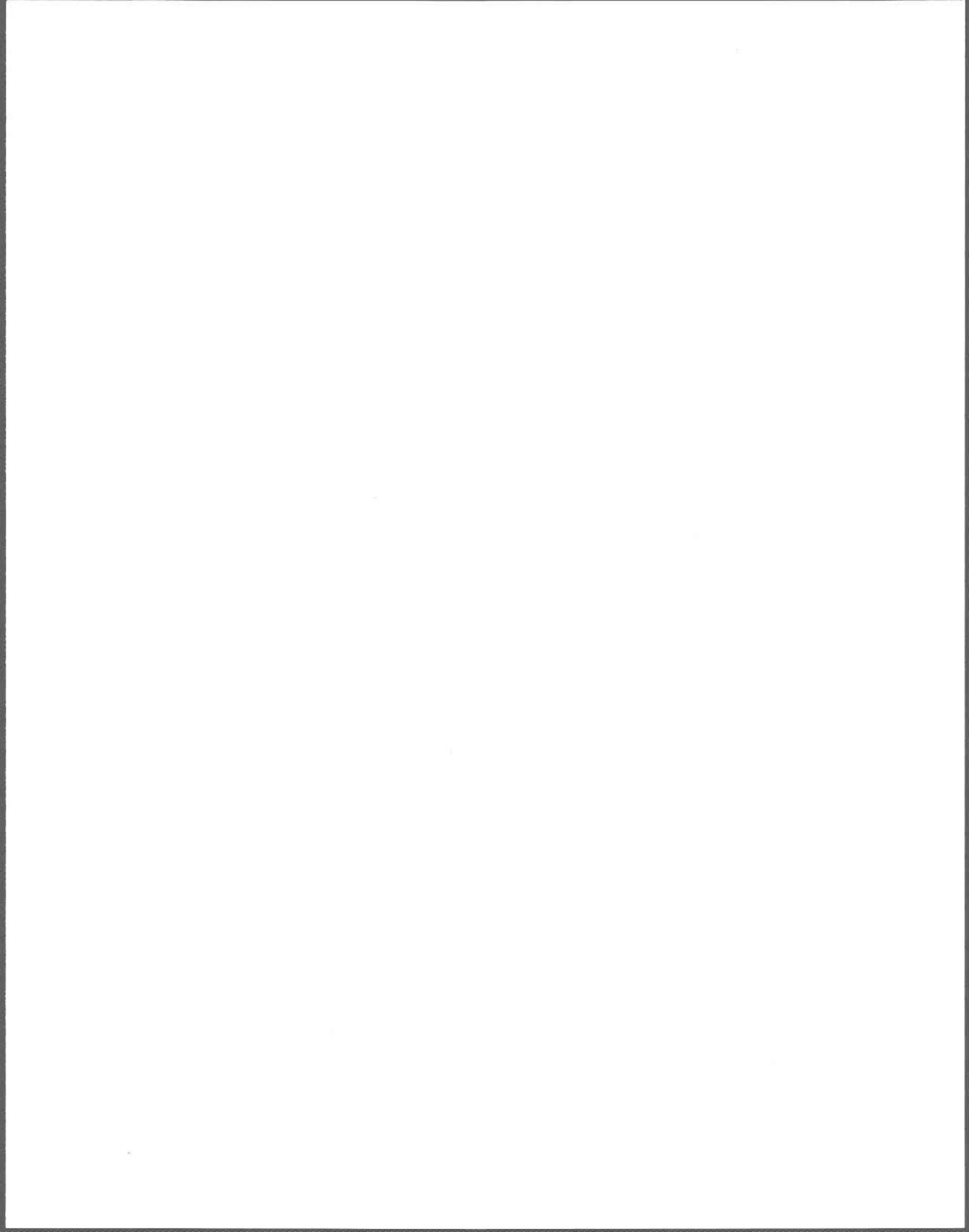
coefficient " r_k " \ (taille d'échantillon) \ variable "t"

*: significatif à 5% de confiance

**: significatif à 1% de confiance

ANNEXE E

Données d'entrée du modèle "Vulpest" non modifié



Généralités

Date: le jour de l'année compris entre 1 et 365.

Distributions:

1. discrète (VAL 0.00 0.00 0.00)
2. uniforme (B.I. B.S. 0.00 0.00)
3. normale (MOY E-T 0.00 0.00)
4. lognormale (MOY E-T 0.00 0.00)
5. assymétrique (C1 C2 B.I. B.S.)

VAL : valeur discrète E-T : écart type
B.I.: borne inférieure C1 : coefficient A
B.S.: borne supérieure C2 : coefficient B
MOY : moyenne

Fichier climat: utilisé pour Saint-Augustin et l'Assomption

100.0	100.0	75.0	80.0	88.0	120.0	115.0	115.0	110.0	95.00	97.00	95.00
36.0	27.0	9.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	2.00	17.00
0.0	0.0	0.0	40.0	85.0	105.0	105.0	100.0	68.0	47.00	0.00	0.00
-15.0	-15.0	-3.0	4.0	9.0	14.0	23.0	24.0	18.0	7.00	2.00	-4.00

Hauteurs mensuelles de pluie (mm)

Hauteurs mensuelles de neige (cm)

Valeurs mensuelles d'évapotranspiration potentielle (mm)

Températures moyennes mensuelles (°C)

Fichier culture: utilisé pour Saint-Augustin et pour l'Assomption

1	.....	Nombre de cultures différentes
165	.....	Date d'émergence de la culture
225	.....	Date de maturité de la culture
1.	200.00 0.00 0.00 0.00	..... Potentiel d'évaporation
1	.....	Ordre des culture

Fichiers pesticides: utilisés pour Saint-Augustin et pour l'Assomption

--Simazine--

1	.....	Nombre de pesticides différents
5.	0.00 4.48 3.00 3.00	..... Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00 0.00 0.00 0.00	..... Profondeur d'application (m)
210	.....	Date d'application du pesticide
1	.....	Nombre d'applications annuelles
1.	5.00 0.00 0.00 0.00	..... Solubilité (mg/l)
1.	53.70 0.00 0.00 0.00	..... Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.007 0.054 0.00 0.00	..... Dégradabilité (/jour)

--Atrazine--

1					Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	Profondeur d'application (m)
210					Date d'application du pesticide
1					Nombre d'applications annuelles
1.	33.00	0.00	0.00	0.00	Solubilité (mg/l)
1.	213.80	0.00	0.00	0.00	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.006	0.015	0.00	0.00	Dégradabilité (/jour)

--Linuron--

1					Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	Profondeur d'application (m)
210					Date d'application du pesticide
1					Nombre d'applications annuelles
1.	75.00	0.00	0.00	0.00	Solubilité (mg/l)
1.	95.50	0.00	0.00	0.00	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.004	0.028	0.00	0.00	Dégradabilité (/jour)

--Picloram--

1					Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	Profondeur d'application (m)
210					Date d'application du pesticide
1					Nombre d'applications annuelles
1.	430.00	0.00	0.00	0.00	Solubilité (mg/l)
1.	1.23	0.00	0.00	0.00	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.005	0.296	0.00	0.00	Dégradabilité (/jour)

--Carbofurane--

1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	.....	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	.....	Profondeur d'application (m)
210	.....	.....	.....	.....	.....	Date d'application du pesticide
1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre d'applications annuelles
1.	700.00	0.00	0.00	0.00	.....	Solubilité (mg/l)
1.	169.80	0.00	0.00	0.00	.....	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.008	0.077	0.00	0.00	.....	Dégradabilité (/jour)

--Dicamda--

1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	.....	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	.....	Profondeur d'application (m)
210	.....	.....	.....	.....	.....	Date d'application du pesticide
1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre d'applications annuelles
1.	4500.0	0.00	0.00	0.00	.....	Solubilité (mg/l)
1.	1.86	0.00	0.00	0.00	.....	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.02	0.214	0.00	0.00	.....	Dégradabilité (/jour)

--Aldicarbe--

1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	.....	Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	.....	Profondeur d'application (m)
210	.....	.....	.....	.....	.....	Date d'application du pesticide
1	.....	.....	.....	.....	.....	Nombre d'applications annuelles
1.	6000.0	0.00	0.00	0.00	.....	Solubilité (mg/l)
1.	3.10	0.00	0.00	0.00	.....	Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.012	0.032	0.00	0.00	.....	Dégradabilité (/jour)

--Isocarbamide--

1	.....						Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	.....		Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	.....		Profondeur d'application (m)
210	.....						Date d'application du pesticide
1	.....						Nombre d'applications annuelles
1.	13000.0	0.00	0.00	0.00	.....		Solubilité (mg/l)
1.	22.30	0.00	0.00	0.00	.....		Coefficient de partition (ml/g)
2.	0.10	0.40	0.00	0.00	.....		Dégradabilité (/jour)

--Diméthoate--

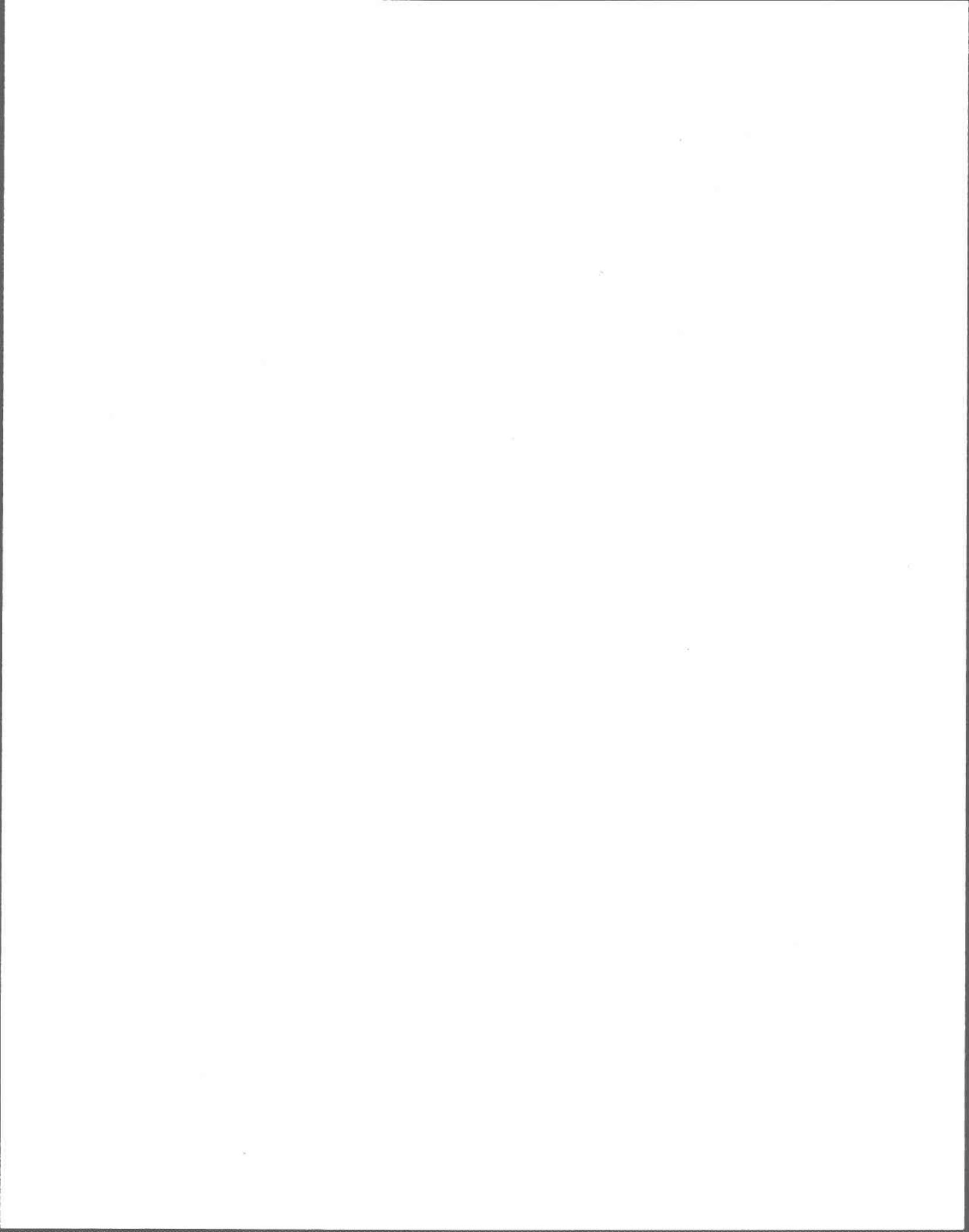
1	.....						Nombre de pesticides différents
5.	0.00	4.48	3.00	3.00	.....		Taux d'application (kg/ha)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	.....		Profondeur d'application (m)
210	.....						Date d'application du pesticide
1	.....						Nombre d'applications annuelles
1.	25000.	0.00	0.00	0.00	.....		Solubilité (mg/l)
1.	16.60	0.00	0.00	0.00	.....		Coefficient de partition (ml/g)
1.	0.006	0.00	0.00	0.00	.....		Dégradabilité (/jour)

Fichier sol: utilisé pour Saint-Augustin

1.	1.15	0.00	0.00	0.00	Profondeur de la nappe (m)
1.	1.15	0.00	0.00	0.00	Epaisseur du sol pédologique (m)
3	.....				Nombre d'horizons
1.	0.35	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>premier horizon</u>
4.	0.33E-4	0.80E-4	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
3.	53.30	1.70	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
3.	24.70	1.20	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
3.	22.10	1.70	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	2.30	0.45	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.447	0.04	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
3.	1.50	0.08	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.40	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>deuxième horizon</u>
4.	0.62E-2	0.10E-1	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
2.	40.80	67.30	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
2.	19.00	31.20	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
2.	12.30	28.20	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	1.70	0.60	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.46	0.039	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
3.	1.41	0.10	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.40	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>troisième horizon</u>
4.	0.76E-2	0.20E-1	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
3.	66.00	4.50	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
3.	19.50	4.20	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
3.	14.50	3.30	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	1.15	0.28	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.44	0.042	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
3.	1.50	0.09	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	C.hydraulique (m/s) <u>substratum</u>
1.	0.35E+0	0.00	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
1.	1.00	0.00	0.00	0.00	Pente du terrain (%)

Fichier sol: utilisé pour l'Assomption

1.	1.25	0.00	0.00	0.00	Profondeur de la nappe (m)
1.	1.25	0.00	0.00	0.00	Epaisseur du sol pédologique (m)
3	.....				Nombre d'horizons
1.	0.30	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>premier horizon</u>
4.	0.58E-4	0.35E-4	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
2.	76.70	86.10	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
2.	6.20	11.00	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
2.	6.50	13.10	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	1.75	0.19	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.40	0.035	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
3.	1.61	0.06	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.50	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>deuxième horizon</u>
4.	0.90E-4	0.20E-3	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
2.	40.00	96.20	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
2.	0.40	23.40	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
2.	3.00	37.40	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	0.72	0.18	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.426	0.045	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
2.	1.40	1.70	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.45	0.00	0.00	0.00	Epaisseur (m) <u>troisième horizon</u>
4.	0.25E-4	0.20E-4	0.00	0.00	Conductivité hydraulique (m/s)
2.	54.90	95.60	0.00	0.00	Pourcentage de sable (%)
2.	1.30	23.60	0.00	0.00	Pourcentage de limon (%)
2.	3.10	21.50	0.00	0.00	Pourcentage d'argile (%)
3.	0.55	0.15	0.00	0.00	Carbone organique (%)
3.	0.39	0.055	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
3.	1.65	0.13	0.00	0.00	Densité (g/cm ³)
1.	0.00	0.00	0.00	0.00	C.hydraulique (m/s) <u>substratum</u>
1.	0.35	0.00	0.00	0.00	Porosité (cm ³ /cm ³)
1.	1.00	0.00	0.00	0.00	Pente du terrain (%)



ANNEXE F

Résultats des modélisations



TABLEAU F-1: PREMIERE ETAPE DE MODELISATIONS POUR SAINT-AUGUSTIN
Modèle Vulpest original et distributions mesurées intégrales

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	0.0	0.0	0.0	2.0 E-09 à 1a sem. 294
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
ATRAZINE	CM	0.0	0.0	0.0	2.0 E-18 à 1a sem. 900
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
LINURON	CM	0.0	0.0	0.0	9.0 E-08 à 1a sem. 458
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
PICLORAM	CM	0.0	0.0	0.0	3.0 E-04 à 1a sem. 95
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
CARBOFURAN	CM	0.0	0.0	0.0	1.0 E-22 à 1a sem. 740
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DICAMBA	CM	0.0	0.0	0.0	1.0 E-07 à 1a sem. 100
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
ALDICARB	CM	.24E-08	.24E-25	0.0	1.0 E-04 à 1a sem. 86
	CA	.43E-12	.34E-29	0.0	
	MC	.10E-11	.99E-29	0.0	
ISOCARBAMID	CM	0.0	0.0	0.0	nil
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	.28E-01	.30E-09	.40E-21	5.0 E-03 à 1a sem. 89
	CA	.80E-08	.98E-14	.11E-25	
	MC	.24E-05	.30E-13	.28E-25	

CM: concentration maximale (mg/l)
CA: concentration annuelle (mg/l)
MC: Masse cumulée (kg/ha)

TABLEAU F-2: DEUXIEME ETAPE DE MODELISATIONS POUR SAINT-AUGUSTIN

Modèle Vulpest hybride incluant des régressions

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	.47E-08	.22E-22	0.0	2.5 E-06 à la sem. 166
	CA	.68E-09	.29E-23	0.0	
	MC	.22E-08	.81E-23	0.0	
ATRAZINE	CM	.20E-11	.37E-24	0.0	5.0 E-10 à la sem. 355
	CA	.51E-13	.10E-25	0.0	
	MC	.16E-12	.24E-25	0.0	
LINURON	CM	.21E-05	.98E-17	0.0	5.0 E-05 à la sem. 430
	CA	.21E-07	.80E-19	0.0	
	MC	.60E-07	.30E-18	0.0	
PICLORAM	CM	.30E-06	0.0	0.0	7.0 E-03 à la sem. 80
	CA	.50E-09	0.0	0.0	
	MC	.14E-08	0.0	0.0	
CARBOFURAN	CM	.17E-26	0.0	0.0	1.0 E-11 à la sem. 370
	CA	.22E-29	0.0	0.0	
	MC	.65E-29	0.0	0.0	
DICAMBA	CM	.25E-06	.60E-25	0.0	3.0 E-05 à la sem. 82
	CA	.39E-10	.90E-29	0.0	
	MC	.11E-09	.30E-28	0.0	
ALDICARB	CM	3.67	.12E-01	.50E-07	1.0 E-03 à la sem. 80
	CA	.44E-03	.14E-05	.60E-11	
	MC	.13E-01	.40E-05	.16E-10	
ISOCARBAMID	CM	0.0	0.0	0.0	1.3 E-30 à la sem. 119
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	829.0	92.2	.91E+00	3.0 E-02 à la sem. 100
	CA	.25E-01	.25E-02	.31E-04	
	MC	.77E-01	.67E-02	.74E-04	

CM: concentration maximale (mg/l)
CA: concentration annuelle (mg/l)
MC: Masse cumulée (kg/ha)

TABLEAU F-5: DEUXIEME ETAPE DE MODELISATIONS POUR L'ASSOMPTION
Modèle Vulpest hybride incluant des régressions

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	.85E-02	.20E-09	.73E-24	1.8 E-02 à 1a sem. 48
	CA	.15E-02	.20E-10	.98E-25	
	MC	.35E-02	.64E-10	.30E-24	
ATRAZINE	CM	.15E-01	.18E-08	.74E-19	2.0 E-02 à 1a sem. 66
	CA	.34E-03	.45E-10	.13E-20	
	MC	.11E-02	.14E-09	.43E-20	
LINURON	CM	.53E+00	.10E-05	.86E-17	6.0 E-02 à 1a sem. 45
	CA	.60E-02	.89E-08	.85E-19	
	MC	.17E-01	.27E-07	.24E-18	
PICLORAM	CM	.94E-01	.49E-18	0.0	6.0 E-02 à 1a sem. 35
	CA	.18E-03	.83E-21	0.0	
	MC	.51E-03	.25E-20	0.0	
CARBOFURAN	CM	.72E-05	.14E-28	0.0	4.0 E-03 à 1a sem. 60
	CA	.71E-08	.12E-31	0.0	
	MC	.19E-07	.30E-31	0.0	
DICAMBA	CM	.39E+00	.38E-13	0.0	7.0 E-02 à 1a sem. 34
	CA	.10E-03	.59E-17	0.0	
	MC	.21E-03	.13E-16	0.0	
ALDICARB	CM	527.0	.16E+01	.38E-03	4.0 E-01 à 1a sem. 33
	CA	.62E-01	.21E-03	.42E-07	
	MC	.18E+00	.58E-03	.12E-06	
ISOCARBAMID	CM	.80E-14	0.0	0.0	2.0 E-04 à 1a sem. 37
	CA	.40E-18	0.0	0.0	
	MC	.10E-17	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	10270.0	1159.0	.66E+02	4.0 E-01 à 1a sem. 35
	CA	.27E+00	.29E-01	.20E-02	
	MC	.81E+00	.85E-01	.54E-02	

CM: concentration maximale (mg/l)
CA: concentration annuelle (mg/l)
MC: Masse cumulée (kg/ha)

TABLEAU F-6: TROISIEME ETAPE DE MODELISATIONS POUR L'ASSOMPTION
Modèle Vulpest original avec certaines distributions modifiées

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	.23E-03	.79E-20	0.0	3.5 E-03 à 1a sem. 55
	CA	.34E-04	.11E-20	0.0	
	MC	.10E-03	.31E-20	0.0	
ATRAZINE	CM	.25E-04	.26E-23	0.0	2.0 E-03 à 1a sem. 78
	CA	.65E-06	.87E-25	0.0	
	MC	.16E-05	.20E-24	0.0	
LINURON	CM	.18E-01	.23E-15	0.0	1.2 E-02 à 1a sem. 54
	CA	.18E-03	.30E-17	0.0	
	MC	.48E-03	.85E-17	0.0	
PICLORAM	CM	.33E-01	.32E-23	0.0	2.5 E-02 à 1a sem. 34
	CA	.53E-04	.53E-26	0.0	
	MC	.15E-03	.13E-25	0.0	
CARBOFURAN	CM	.63E-12	0.0	0.0	3.0 E-04 à 1a sem. 78
	CA	.76E-15	0.0	0.0	
	MC	.20E-14	0.0	0.0	
DICAMBA	CM	.26E+00	.11E-18	0.0	1.8 E-02 à 1a sem. 38
	CA	.43E-04	.17E-22	0.0	
	MC	.11E-03	.54E-22	0.0	
ALDICARB	CM	371.0	.55E-01	.28E-20	1.2 E-01 à 1a sem. 35
	CA	.55E-01	.62E-05	.34E-24	
	MC	.15E+00	.17E-04	.98E-24	
ISICARBAMID	CM	.19E-18	0.0	0.0	2.5 E-06 à 1a sem. 42
	CA	.90E-23	0.0	0.0	
	MC	.29E-22	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	7599.0	171.0	.52E-06	2.5 E-01 à 1a sem. 37
	CA	.23E+00	.55E-02	.14E-10	
	MC	.66E+00	.15E-01	.42E-10	

CM: concentration maximale (mg/l)
CA: concentration annuelle (mg/l)
MC: Masse cumulée (kg/ha)

TABLEAU F-3: TROISIEME ETAPE DE MODELISATIONS POUR SAINT-AUGUSTIN
 Modèle Vulpest original avec certaines distributions modifiées

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	.90E-18	0.0	0.0	2.0 E-08 à la sem. 230
	CA	.15E-18	0.0	0.0	
	MC	.39E-18	0.0	0.0	
ATRAZINE	CM	.40E-26	0.0	0.0	5.0 E-14 à la sem. 620
	CA	.10E-27	0.0	0.0	
	MC	.34E-27	0.0	0.0	
LINURON	CM	.15E-13	0.0	0.0	2.0 E-08 à la sem. 540
	CA	.50E-15	0.0	0.0	
	MC	.60E-15	0.0	0.0	
PICLORAM	CM	.46E-15	0.0	0.0	3.5 E-03 à la sem. 115
	CA	.98E-18	0.0	0.0	
	MC	.18E-17	0.0	0.0	
CARBOFURAN	CM	0.0	0.0	0.0	1.0 E-16 à la sem. 625
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DICAMBA	CM	.33E-16	0.0	0.0	1.5 E-07 à la sem. 120
	CA	.80E-20	0.0	0.0	
	MC	.14E-19	0.0	0.0	
ALDICARB	CM	.53E-02	.21E-11	0.0	5.0 E-05 à la sem. 105
	CA	.96E-06	.29E-15	0.0	
	MC	.18E-05	.71E-15	0.0	
ISICARBAMID	CM	0.0	0.0	0.0	nil
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	22.5	.37E-02	.10E-14	4.0 E--04 à la sem. 143
	CA	.89E-03	.14E-06	.26E-19	
	MC	.19E-02	.35E-06	.75E-19	

CM: concentration maximale (mg/l)
 CA: concentration annuelle (mg/l)
 MC: Masse cumulée (kg/ha)

TABLEAU F-4: PREMIERE ETAPE DE MODELISATIONS POUR L'ASSOMPTION
Modèle Vulpest original et distributions mesurées intégrales

PESTICIDE	T Y P E	RESULTATS DES SIMULATIONS: versus trois probabilités de dépassement			APPARITION DU PESTICIDE A LA NAPPE PHREATIQUE (mg/l, sem)
		P = 0.1	P = 0.5	P = 0.9	
SIMAZINE	CM	.73E-25	0.0	0.0	5.0 E-09 à la sem. 280
	CA	.95E-26	0.0	0.0	
	MC	.29E-25	0.0	0.0	
ATRAZINE	CM	0.0	0.0	0.0	1.0 E-15 à la sem. 720
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
LINURON	CM	.12E-18	0.0	0.0	1.0 E-07 à la sem. 400
	CA	.14E-20	0.0	0.0	
	MC	.39E-20	0.0	0.0	
PICLORAM	CM	.55E-27	0.0	0.0	3.5 E-05 à la sem. 120
	CA	.13E-29	0.0	0.0	
	MC	.42E-29	0.0	0.0	
CARBOFURAN	CM	0.0	0.0	0.0	7.0 E-19 à la sem. 618
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DICAMBA	CM	0.0	0.0	0.0	5.0 E-09 à la sem. 126
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
ALDICARB	CM	.13E-06	.34E-19	0.0	1.0 E-05 à la sem. 130
	CA	.14E-10	.55E-23	0.0	
	MC	.35E-10	.15E-22	0.0	
ISOCARBAMID	CM	0.0	0.0	0.0	nil
	CA	0.0	0.0	0.0	
	MC	0.0	0.0	0.0	
DIMETHOATE	CM	.41E+00	.29E-04	.22E-11	2.0 E-04 à la sem. 152
	CA	.12E-04	.92E-09	.71E-16	
	MC	.37E-04	.26E-08	.20E-15	

CM: concentration maximale (mg/l)
CA: concentration annuelle (mg/l)
MC: Masse cumulée (kg/ha)