



ECOLE DES MINES  
DE PARIS  
Collège doctoral

TH - NB 11

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

## THESE

pour obtenir le grade de  
**Docteur de l'Ecole des Mines de Paris**  
Spécialité "Géologie de l'Ingénieur"

présentée et soutenue publiquement par  
**Isabelle GUINLE-THENEVIN**

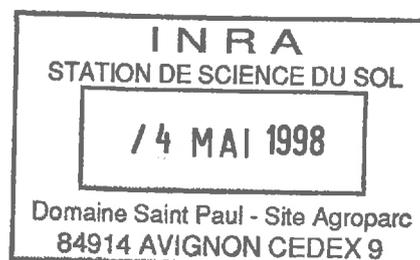
le 5 février 1998

**INFLUENCE DES VALEURS EXTREMES (MILLENNALES)  
DES DONNEES PHYSIQUES DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL  
SUR LE SOL ET LE PROCHE SOUS-SOL  
APPLICATION AUX SITES DE STOCKAGE DE DECHETS**

*Directeur de thèse : Michel DEVEUGHELE*

### Jury

M. J.P. TISOT	Président et Rapporteur
M. A. PARRIAUX	Rapporteur
M. M. ARNOULD	Examineur
M. M. DEVEUGHELE	Examineur
M. A. DUPAS	Examineur
M. J.P. LABORDE	Examineur



## Avant-propos

---

Je voudrais exprimer ici ma gratitude envers les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien tout au long de ces années d'étude.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. le Professeur M. Arnould pour m'avoir accueillie au Centre de Géologie de l'Ingénieur, commun à l'Ecole des Mines de Paris et à l'Ecole des Ponts et Chaussées. C'est à son invitation que j'ai découvert les problèmes posés par les couvertures de stockages de déchets. Il a en outre accepté d'être examinateur de ma thèse et apporté un soin particulier à la correction de ce mémoire.

Je souhaite tout particulièrement remercier M. M. Deveughèle, Directeur du Centre de Géologie de l'Ingénieur, qui a dirigé mon travail et consacré beaucoup de son temps à la réalisation et à la correction du présent mémoire.

M. le Professeur J.P. Tisot, Directeur de l'Ecole Nationale de Géologie de Nancy, m'a fait l'honneur d'être rapporteur de ce mémoire qui est en partie la conclusion de mes études en Géologie de l'Ingénieur entreprises sous sa tutelle, je l'en remercie vivement.

Je remercie M. le Professeur A. Parriaux Directeur du Laboratoire de Géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour avoir accepté de participer au jury et pour son intérêt à ce travail puisqu'il avait encadré la thèse de Gabriel de Los Cobos dont quelques données ont été utilisées.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. A. Dupas, Chargé de Recherche au Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil, Unité Mixte de Recherche 113 CNRS- LCPC pour avoir mis à ma disposition le logiciel GELSOL et pour m'avoir accompagné lors de son utilisation.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à M. J.P. Laborde, Professeur à l'Université de Nice - Sophia Antipolis Examineur de cette thèse.

Je ne peux oublier de remercier le Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris M. J. Lévy et M B. Legait, Directeur des Recherches, pour m'avoir attribué une bourse de thèse et avoir permis la réalisation de cette étude.

Ce travail doit également beaucoup à M. J. Billiotte et M. J.M. Le Cleac'h dont j'ai sollicité les compétences à bien des reprises. Enfin je souhaite remercier l'ensemble des Enseignants - Chercheurs du Centre pour leur aide et leur accueil.

L'amitié et l'humour de mes camarades de thèse m'ont été d'un grand secours. Je citerais, parmi eux, L. Chenoufi, H. Bargui, N. Velly, F. Vanbrabant, X. Daupley. Je n'oublie pas non plus les techniciens du C.G.I. et nos secrétaires.

Météo France a fourni gracieusement l'ensemble des données météorologiques utilisées dans cette étude.

## Résumé

---

La pérennité des propriétés des couvertures définitives en matériaux naturels des stockages de surface de déchets toxiques, radioactifs et de résidus minier est délicate à assurer. En effet celle-ci dépend à moyen terme des événements climatiques « violents » tels que les averses orageuses, les hivers rigoureux et les sécheresses estivales. Ces agressions climatiques induisent des phénomènes importants sur les sols : le décapage de l'érosion emporte une partie de ces couvertures ; le gel perturbe la structure des matériaux et en modifie considérablement les propriétés ; les sécheresses provoquent le retrait ou des fissurations parfois irréversibles. Toutefois, en France, la réglementation actuelle impose que la pérennité des structures ou de leurs propriétés soient garanties à long terme voire de façon "définitive". A défaut d'aller jusqu'à une telle pérennité, les séries météorologiques existant en France, les données historiques autorisent une prévision millénaire fiable pour les précipitations, le gel, la sécheresse.

Une étude bibliographique fait d'abord le point sur différents aspects : effets sur le sol des événements climatiques, présentations des stockages de déchets français, localisation et réglementation, type de couverture utilisée. La quantification de chaque type d'événement climatique et de ses effets au sol est ensuite traitée individuellement et fait l'objet d'un exemple précis de calcul. L'ampleur et la fréquence des événements climatiques sont évaluées par le biais des outils statistiques (ajustement à des lois de valeurs extrêmes, extrapolation et calcul de l'aléa).

L'érosivité des averses et l'érosion résultante sont évaluées pour un site de stockage en climat méditerranéen par le biais de l'équation de perte en terre. La profondeur atteinte par le gel dans la couverture d'un stockage dans l'Est de la France est calculée à partir du logiciel GELSOL développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Enfin une méthode est proposée pour quantifier l'épaisseur de dessiccation provoquée par la sécheresse sur un site du Sud-Ouest de la France.

Chacun de ces cas d'application reprend les différentes étapes du calcul : évaluation quantitative et statistique des événements climatiques correspondants (érosivité des averses, indice de gel, indices de sécheresse), étude des caractéristiques des matériaux naturels liées à chacun des phénomènes (pétrographie, propriétés thermiques et hydrauliques), et la modélisation numérique des matériaux ou des couvertures (méthodes aux éléments finis ou aux différences finies).

Les conclusions de chaque partie mettent en évidence les paramètres critiques du dimensionnement des couvertures de stockage de déchets ou de résidus miniers vis à vis des événements climatiques extrêmes retenus.

# Sommaire

---

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 - EFFETS AU SOL DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES.....	5
1. <i>Effet à l'interface sol - atmosphère : érosion et impacts de foudre</i> .....	5
1.1. Erosion pluviale.....	5
1.2. Erosion éolienne .....	9
1.3. Impacts de foudre .....	11
2. <i>Effets du gel</i> .....	11
2.1. Effets sur les matériaux poreux et fracturés : gélifraction .....	11
2.2. Effet sur les limons et argiles compactées : gonflement .....	11
2.2.1. Principe général.....	11
2.2.2. Détail du phénomène.....	12
2.3. Remaniement de matériaux .....	13
3. <i>Effets liés à la dessiccation</i> .....	15
3.1. Retrait .....	15
3.2. Fissuration .....	17
3.2.1. Principe général.....	17
3.2.2. Détail du phénomène.....	18
CHAPITRE 2 - COUVERTURES DE STOCKAGES DE DÉCHETS .....	19
1. <i>Différents types de matériaux</i> .....	19
1.1. Déchets toxiques.....	19
1.2. Déchets radioactifs .....	20
1.3. Déchets miniers .....	20
2. <i>Aspects législatifs des stockages de déchets</i> .....	22
2.1. Installations classées.....	22
2.2. Installations nucléaires de base .....	24
2.3. Bilan et évolution de la législation .....	25
3. <i>Dispositifs existants ou prévus</i> .....	25
3.1. Niveau superficiel enherbé ou planté .....	26
3.2. Barrière biologique .....	26
3.3. Système de drainage .....	26
3.4. Système d'imperméabilisation .....	26
3.5. Système de drainage des gaz .....	26
3.6. Quelques exemples .....	26
CHAPITRE 3 - PRÉVISION DE L'ÉROSION .....	29
1. <i>Erosivité d'une averse</i> .....	29
1.1. Définition.....	29
1.2. Calcul.....	29
2. <i>Erosivité des averses prévisibles</i> .....	31
2.1. Données historiques ou mondiales .....	32

2.1.1. Précipitations journalières.....	33
2.1.2. Intensité des précipitations.....	33
2.2. Ajustement statistique et extrapolation .....	34
2.2.1. Problèmes des séries de données hétérogènes .....	35
2.2.1.1. La méthode des doubles cumuls .....	35
2.2.1.2. Le test des concordances.....	35
2.2.1.3. Reconstitution d'une série homogène à partir d'une série hétérogène .....	36
2.2.2. Problèmes d'insuffisance de données.....	36
2.2.3. Problèmes liés à l'abondance des données.....	37
2.2.4. Problèmes liés à la qualité des données .....	37
2.3. Aléas statistiques .....	37
3. <i>Calcul de la perte en terre</i> .....	39
3.1. Présentation .....	39
4. <i>Cas d'application</i> .....	41
4.1. Précipitations et érosivité des averses .....	42
4.1.1. Averses et intensité de précipitation .....	42
4.1.1.1. Averses.....	42
4.1.1.2. Intensité de précipitation.....	44
4.1.2. Evénements pluvieux .....	46
4.1.2.1. Rappels historiques .....	46
4.1.2.2. Etudes statistiques.....	48
4.1.3. Érosivité des averses statistiques prévisibles.....	52
4.2. Erosion.....	53
4.2.1. Paramètre d'érosivité : R ou EI .....	53
4.2.2. Paramètre K.....	53
4.2.3. Paramètres LS .....	55
4.2.4. Paramètres C, P .....	55
4.2.5. Résultats et interprétations .....	55
5. <i>Conclusion</i> .....	59
CHAPITRE 4 - PRÉVISION DES ÉPAISSEURS DE GEL .....	61
1. <i>Prévision des épaisseurs de gel à partir de la température du sol</i> .....	61
1.1. Exemple de calcul : Paris - Monsouris.....	61
1.1.1. Données.....	61
1.1.2. Ajustement statistique .....	63
1.1.3. Aléa statistique .....	65
1.1.4. Conclusions et remarques .....	65
2. <i>Définition et calcul de l'indice de gel</i> .....	67
2.1. Définition de l'indice de gel.....	67
2.2. Calcul de l'indice de gel .....	67
3. <i>Indices de gel des hivers prévisibles</i> .....	68
3.1. Données historiques.....	68
3.2. Ajustement statistique et extrapolation .....	69
4. <i>Calcul des épaisseurs de gel</i> .....	69
4.1. Rappels théoriques sur les échanges de chaleur.....	69
4.1.1. Conductibilité thermique.....	70
4.1.2. Capacité calorifique .....	72
4.1.3. Chaleur latente de congélation .....	72
4.1.4. Transfert de chaleur par conduction.....	72

4.1.5. Conclusions pratiques .....	72
4.2. Présentation du logiciel GELSOL .....	73
4.2.1. Données d'entrée.....	73
4.3. Application .....	73
4.3.1. Géométrie de la couverture et maillage .....	74
4.3.2. Conditions aux limites .....	77
4.3.3. Caractéristiques thermiques des différents matériaux .....	78
4.3.4. Calculs.....	78
4.3.5. Résultats de validation et d'optimisation .....	80
4.3.6. Résultats de la modélisation millennale.....	83
4.3.7. Analyse des résultats.....	86
5. Conclusion.....	87
CHAPITRE 5 - PRÉVISION DES ÉPAISSEURS DE DESSICCATION .....	89
1. Indices de sécheresse.....	89
1.1. Revue bibliographique.....	89
1.1.1. Indice descriptif.....	89
1.1.2. Indices d'anomalie de précipitations .....	91
1.1.3. Indices «alimentation / demande» basés sur l'équilibre hydrique .....	91
1.1.4. Indice récursif : PDSI.....	94
1.1.4.1. Présentation du PDSI.....	94
1.1.4.2. Calcul du PDSI à Bergerac sur 65 années .....	96
1.1.5. Comparaison et analyse de la pertinence des indices .....	98
1.1.6. Conclusions et remarques .....	100
1.2. Nouvel indice adapté aux calculs des épaisseurs de dessiccation.....	101
1.2.1. Définition .....	101
1.2.2. Exemple de calcul .....	102
1.2.2.1. Calcul de l'évapotranspiration.....	102
1.2.3. Précipitations.....	103
1.2.4. Performance de l'indice .....	105
2. Présentation du modèle hydrique.....	107
2.1. Modèle numérique.....	107
2.2. Données d'entrée .....	108
2.3. Conditions aux limites .....	111
2.3.1. Limite supérieure du modèle.....	111
2.3.2. Limite inférieure du modèle.....	111
2.4. Validations numériques du modèle .....	112
2.4.1. Vérification numérique .....	112
2.4.2. Validation numérique.....	113
2.4.2.1. Test 1.....	113
2.4.2.2. Test 2.....	114
2.5. Validation expérimentale du modèle.....	116
2.5.1. Caractéristiques du matériaux .....	116
2.5.2. Choix du volume représentatif et des conditions aux limites. ....	118
2.5.3. Comparaison des résultats.....	119
3. Application .....	121
3.1. Prévision de l'indice des sécheresses extrêmes.....	121
3.2. Simulation de ces sécheresses sur des sols.....	122
3.2.1. Simulation de ces sécheresses sur un sol argileux.....	122
3.2.2. Simulation de ces sécheresses sur un sol sableux.....	128

3.2.3. Analyse des résultats.....	132
4. Conclusion.....	134
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	137
ANNEXE 1 : CALCUL DE L'ÉROSIVITÉ D'UNE AVERSE.....	143
ANNEXE 2 : CHRONIQUES CLIMATOLOGIQUES : HIVERS.....	147
ANNEXE 3 : CHRONIQUES CLIMATOLOGIQUES : ÉTÉS.....	151
ANNEXE 4 : FICHES D'ESSAIS DU LOGICIEL GELSOL.....	155
ANNEXE 5 : CONDUCTIVITÉS THERMIQUES.....	175

## Liste des figures

---

Figure 1. 1 : Erosion de versant sur des argilites rouges en climat méditerranéen	6
Figure 1. 2 : Erosion sur des matériaux plus fins en climat méditerranéen	7
Figure 1. 3 : Différents mécanismes à l'origine de la division des agrégats par l'eau (d'après Y. Le Bissonnait, 1988)	8
Figure 1. 4 : Principe du phénomène de cryoclastie	12
Figure 1. 5 : Principe du phénomène de gonflement au gel	13
Figure 1. 6: Bulbes de convection dans l'Est de la France	14
Figure 1. 7 : Schématisation des phénomènes de retrait et de fissuration sur un sol argileux	15
Figure 1. 8 : Limite de retrait d'Atterberg	16
Figure 1. 9 : Relation succion - teneur en eau théorique d'un sol fin type	16
Figure 2. 1 : Localisation des Mines d'Uranium Françaises citées	21
Figure 2. 2 : Localisation des Centres français d'Enfouissement Techniques de Classe I (d'après ADEME)	23
Figure 2. 3 : Photographie du Centre Manche (cliché ANDRA)	25
Figure 2. 4 : Projet de couverture du Centre de l'Aube (d'après ANDRA, 1993)	27
Figure 2. 5 : Concept français du stockage superficiel de déchets ultimes dangereux (d'après Begassat, 1996)	28
Figure 3. 1 : HyétoGramme de l'averse	30
Figure 3. 2 : Erosivité des pluies en France, Répartition de l'indice R de Wishmeier (d'après Pihan, 1978)	31
Figure 3. 3 : Les hauteurs de pluie record dans le monde pour différentes durées (d'après Woolard, 1941)	32
Figure 3. 4 : Abaques de Bernier pour la loi de Gumbel	38
Figure 3. 5 : Carte des stations météorologiques du département de l'Hérault (34) et des stations voisines	41
Figure 3. 6 : Relation hauteur de précipitation - durée de l'averse pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier	43
Figure 3. 7 : Comparaison des hauteurs de précipitations - durées des averses pour les stations de Nîmes Montpellier et Paris pour différentes périodes de retour	44
Figure 3. 8 : Courbes intensité - durée des averses pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier	45
Figure 3. 9 : Comparaison des intensités de précipitations - durées des averses pour les stations de Nîmes Montpellier et Paris pour différentes périodes de retour	46
Figure 3. 10 : Répartition mensuelle des événements pluvieux supérieurs à 200 mm en 24 h	48
Figure 3. 11 : Ajustement des précipitations maximales quotidiennes à la loi log-normale et à la loi de Gumbel	50
Figure 3. 12 : HyétoGramme des averses types	52
Figure 3. 13 : Courbe granulométrique de l'échantillon R2T (d'après J Ménézes, 1996)	54
Figure 3. 14 : Répartition des fines de l'échantillon de sol	54
Figure 3. 15 : Evaluation de l'érosion en fonction de l'érodabilité du sol pour une pente de 7%	58
Figure 3. 16 : Evaluation de l'érosion en fonction de la pente pour une érodabilité de 0,27	58

Figure 4. 1 : Ajustement aux lois de Gumbel et de Fréchet de la température minimale annuelle	64
Figure 4. 2 : Température moyenne quotidienne à Langres au cours de l'hiver 1984/85	67
Figure 4. 3 : Température quotidienne cumulée à Langres au cours de l'hiver 1984/85	68
Figure 4. 4 : Ajustement des indices de gel de 3 stations et vérification des ajustements pour Clermont Ferrand	70
Figure 4. 5 : Coefficient de conductibilité thermique d'après les formules de Kersten	71
Figure 4. 6 : Géométrie de la couverture modélisée	74
Figure 4. 7 : Maillage de la structure multicouche	76
Figure 4. 8 : Différents scénarios de température de l'air	77
Figure 4. 9 : Profondeur de gel en fonction de la racine carrée de l'indice de gel de la modélisation millennale sèche	81
Figure 4. 10 : Profil de température dans le sol le 30 <sup>ème</sup> jour des essais 002 et 010 effet du flux terrestre	82
Figure 4. 11 : Fiche de l'essai 106	84
Figure 4. 12 : Profils de température des essais 106, 107 et 108	85
Figure 4. 13 : Profondeur du front de gel en fonction du temps pour l'essai 106	86
Figure 5. 1 : Diagramme ombrothermique de Bergerac	90
Figure 5. 2 : Diagramme ombrothermique au Mayet de Montagne	90
Figure 5. 3 : Comparaison de l'évolution des indices de sécheresse sur 4 ans à Bergerac	94
Figure 5. 4 : Bilan d'eau sur 2 couches superposées	95
Figure 5. 5 : Evapotranspiration potentielle à Bergerac pour l'année 1989	103
Figure 5. 6 : Précipitation à Bergerac pour l'année 1989	104
Figure 5. 7 : Flux hydrique journalier de 1989 à 1994 à Bergerac	104
Figure 5. 8 : Portion verticale de sol	108
Figure 5. 9 : Relation succion - teneur en eau du sol type	110
Figure 5. 10 : Relation capacité capillaire - succion du sol type	110
Figure 5. 11 : Relation conductivité - succion pour le sol type	111
Figure 5. 12 : Profil des succions dans le sol	113
Figure 5. 13 : Bilan hydrique du test 1	113
Figure 5. 14 : Profil des succions test 2 - infiltration forte	114
Figure 5. 15 : Profil des succions test 2 - infiltration faible	115
Figure 5. 16 : Profil des succions test 2 - évaporation	115
Figure 5. 17 : Bilans hydriques du test 2	116
Figure 5. 18 : Courbe succion - teneur en eau de la boue	117
Figure 5. 19 : Courbe capacité capillaire - succion de la boue	117
Figure 5. 20 : Courbe conductivité - succion de la boue	118
Figure 5. 21 : Profils des teneurs en eau calculés par le modèle	120
Figure 5. 22 : Profils des teneurs en eau mesurées par de Los Cobos	120
Figure 5. 23 : Ajustement des indices de sécheresse à Bergerac	121
Figure 5. 24 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse décennale	123
Figure 5. 25 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse centennale	123
Figure 5. 26 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse millennale	124
Figure 5. 27 : Bilan hydrique des calculs	124

<i>Figure 5. 28 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction du temps</i>	125
<i>Figure 5. 29 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse décennale</i>	126
<i>Figure 5. 30 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse centennale</i>	127
<i>Figure 5. 31 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse millennale</i>	127
<i>Figure 5. 32 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse décennale</i>	129
<i>Figure 5. 33 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse centennale</i>	129
<i>Figure 5. 34 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse millennale</i>	130
<i>Figure 5. 35 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction du temps</i>	130
<i>Figure 5. 36 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse décennale</i>	131
<i>Figure 5. 37 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse centennale</i>	131
<i>Figure 5. 38 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse millennale</i>	132
<i>Figure 5. 39 : Répartition de 551 cas de sinistre en fonction de la profondeur de fondation (tiré de Faccendini, 1992)</i>	133

## Liste des tableaux

---

Tableau 1. 1 : Erosion annuelle dans divers bassins versants (d'après Hénensal, 1987)	9
Tableau 1. 2 : Erosions ponctuelles	9
Tableau 2. 1 : Tableau de synthèse depuis le décret du 18/04/1988	25
Tableau 2. 2 : Couvertures de stockage existantes ou en projet	27
Tableau 3. 1 : Averses françaises extrêmes	33
Tableau 3. 2 : Précipitations journalières extrêmes	33
Tableau 3. 3 : Intensité des précipitations françaises remarquables (d'après Jacq, 1994)	34
Tableau 3. 4 : Ecart observés entre les modules pluviométriques moyens	37
Tableau 3. 5 : Valeurs d'érodabilité des sols : K (tiré de BRGM, 1992)	40
Tableau 3. 6 : Indice des pratiques anti-érosives : P (tiré de BRGM, 1992)	41
Tableau 3. 7 : Evénements pluvieux de grande ampleur géographique	47
Tableau 3. 8 : Précipitations maximales quotidiennes à Nîmes, Montpellier et le Bousquet d'Orb	49
Tableau 3. 9 : Matrice des coefficients de corrélation entre les séries de Nîmes, Montpellier et le Bousquet d'Orb	51
Tableau 3. 10 : Précipitations quotidiennes maximales (en mm) d'après les ajustements	51
Tableau 3. 11 : Intervalles de confiance à 95 % et 70 % des ajustements pour la loi de Gumbel	51
Tableau 3. 12 : Calcul de l'érosion	55
Tableau 4. 1 : Minimum absolu annuel des températures en °C à différentes profondeurs à la station de Paris - Montsouris (d'après Garnier, 1982).	62
Tableau 4. 2 : Synthèse de l'ajustement de la température minimale annuelle à différentes profondeurs à la station de Paris - Montsouris	63
Tableau 4. 3 : Intervalles de confiance des températures millénales, centennales et décennales en °C à différentes profondeurs à Paris - Montsouris	66
Tableau 4. 4 : Synthèse des ajustements statistiques pour les 4 stations	69
Tableau 4. 5 : Exemple des caractéristiques physiques et thermiques des matériaux de la couverture	78
Tableau 4. 6 : Données d'entrée de l'ensemble des calculs	79
Tableau 5. 1 : Moyennes et écarts-type des précipitations (en mm) et des températures mensuelles (en °C) à Bergerac pour la période 1930-1995	92
Tableau 5. 2 : Calcul des indices de sécheresse à Bergerac pour la période 1989-1992	93
Tableau 5. 3 : PDSI à Bergerac de 1930 à 1995	96
Tableau 5. 4 : Classes de sécheresse d'après Farago et al.	98
Tableau 5. 5 : Comparaison de la pertinence des indices de sécheresse	99
Tableau 5. 6 : Pertinence du nouvel indice de sécheresse	106
Tableau 5. 7 : Intervalle de confiance à 70 % d'après l'abaque de Bernier	121
Tableau 5. 8 : Profondeur de la teneur en eau limite dans le cas des sécheresses extrêmes	133

# Introduction

---

Le stockage définitif en surface des déchets toxiques, radioactifs aussi bien que celui des résidus de traitement des minerais sont des problèmes d'actualité. Dès la phase de réalisation des travaux et jusqu'au long terme, l'étude de la stabilité mécanique des stockages qui sont, en partie constitués de matériaux non inertes et évolutifs, ne relève pas seulement des approches géotechniques traditionnelles et nécessite souvent des études spécifiques détaillées. L'évaluation précise de l'impact des stockages sur le milieu naturel est primordiale pour assurer la préservation de celui-ci et la définition et le dimensionnement de dispositifs complémentaires à mettre en œuvre pour minimiser l'émission de polluants éventuels. Parmi ces dispositifs, la mise en place d'une couverture des produits stockés vise à la fois à réguler et à minimiser les transferts vers et à partir du milieu environnant et à protéger les stockages des agressions des agents extérieurs. Il est bien évidemment essentiel de s'assurer de la pérennité des propriétés de barrière et de protection d'une telle couverture. Le cas des anciennes exploitations et usines de traitement de minerais d'uranium est un cas particulier. En l'absence de réglementations générales ou particulières, les déchets et résidus produits ne relevant notamment pas de celles relatives aux déchets toxiques ultimes, il convient de concevoir et de valider des principes constructifs et des dispositifs de protection du stockage et de l'environnement adaptés aux spécificités de ces matériaux et au contexte local, qui puissent être agréés par les autorités de sûreté compétentes.

## Problématique générale

L'intégrité du stockage et de sa couverture et la limitation de l'impact sur le milieu environnant doivent être appréciées en prenant en compte le facteur temps. On peut, de ce point de vue, distinguer, en fonction de l'âge du stockage, plusieurs périodes :

- la phase de réalisation ou de travaux ;
- la durée de garantie ou le court terme (de quelques années à une vingtaine d'années, 10 ans le plus souvent) ;
- la durée d'amortissement ou le moyen terme (quelques dizaines d'années -50 ans en général) ;
- le long terme.

Les trois premières périodes font appel à une approche de type « ingénierie » car une prévision quantitative est possible par extrapolation de données historiques tandis que la dernière relève plutôt des méthodes géologiques plus qualitatives.

L'ensemble des problèmes à envisager doit bien évidemment l'être dès la conception du stockage. On peut cependant les examiner selon leur acuité en fonction de l'âge relatif du stockage. On retiendra que pendant toute la durée du stockage le risque de transfert de polluant est un risque majeur.

Pendant la période de réalisation des travaux et le court terme, ce sont sans doute les problèmes de stabilité mécanique qui dominent. La stabilité mécanique de la couverture elle-même ne peut être étudiée indépendamment de celle de l'ensemble du stockage (tassements, y

compris différentiels ; stabilité des pentes) et de son réceptacle (une ancienne exploitation à ciel ouvert, un thalweg barré par une digue, un bassin endigué...). Une bonne connaissance de la géométrie du stockage et du substrat ainsi que des caractéristiques géotechniques, hydrogéologiques et géochimiques des différents matériaux constitutifs du stockage et du sol de fondation est essentielle. Outre les problèmes directs et immédiats de stabilité mécanique, cette connaissance devra permettre d'apprécier les potentialités d'évolution des matériaux en place (modifications granulométriques et de texture, migration de fines, changements de volume ou pertes de cohésion par dissolution - recristallisation, établissement d'une nappe et battements du niveau piézométrique, érosion de surface...) susceptibles de modifier dans le temps les conditions de stabilité de l'ouvrage et ce dans des délais qui peuvent être parfois très courts en regard de ceux que nécessitent les processus naturels de stabilisation.

À moyen terme, ce sont les risques d'altération de la couverture via les processus d'érosion, de transformation physique ou géochimique, ou encore via des agents extérieurs comme les animaux fouisseurs ou la végétation, qui doivent être examinés. Les facteurs de risque relèvent ici essentiellement de la climatologie et des effets au sol des événements climatiques moyens mais aussi extrêmes et successifs. Pour la couverture, les événements climatiques exceptionnels doivent faire l'objet d'une attention particulière et il convient, dans chaque contexte particulier, de s'interroger sur la nature des événements à considérer, en fonction de la localisation (région climatique, conditions microclimatiques locales) du site de stockage et de leurs effets au sol prévisibles, mais aussi sur la fréquence de retour à envisager. De ce point de vue la détermination des événements millennaux est à la fois possible et nécessaire. Les effets au sol à envisager concernent l'érosion pluviale, les modifications de texture des matériaux liés aux phénomènes de dessiccation et d'imbibition, les effets du gel, l'érosion éolienne mais aussi des effets plus localisés comme ceux de l'impact de la foudre. C'est à ce terme également que devront principalement être appréciés les problèmes de stabilité géochimique des matériaux de la couverture mais aussi des matériaux stockés et que devront être examinées les conséquences au niveau du stockage de l'évolution prévisible du cadre géomorphologique régional et local.

Chaque site de stockage doit faire l'objet d'une étude particulière. En effet, dans la mesure où les risques sont étroitement liés au milieu naturel local et aux produits stockés eux-mêmes, l'institution d'un schéma unique et rigide de validation d'un stockage serait inadaptée. Il conviendra donc de procéder, chaque fois, dans un premier temps à une hiérarchisation des risques propres au site concerné, puis d'examiner l'adaptation du projet à leur prévention, en envisageant, le cas échéant, les dispositions complémentaires à mettre en œuvre et les études à mener pour la validation du stockage. Bien évidemment les sites de stockages définitifs déjà existants ne pourront pas être traités selon la même méthodologie que les sites en cours de constitution ou en projet.

### **Événements climatiques et effets au sol**

La contribution du présent mémoire à la problématique générale évoquée ci-avant est limitée à une étude générale des effets au sol des événements climatiques susceptibles d'affecter le territoire français, notamment des événements climatiques exceptionnels. Elle s'appuie sur une étude bibliographique, une enquête auprès de spécialistes de ces phénomènes dans des domaines déjà concernés par des problèmes de même nature (stockages de déchets mais aussi génie civil, minier ou rural) ainsi que sur les propres retours d'expérience du Centre de

Géologie de l'Ingénieur. La réflexion a porté sur l'inventaire des événements climatiques, notamment extrêmes, à prendre en considération en fonction de leur effets au sol prévisibles; détermination d'indices climatiques pertinents pour l'étude des effets au sol ; méthodes d'évaluation de l'occurrence des événements considérés susceptibles d'être utilisées dans une approche de type « ingénierie » ; description et quantification des effets au sol.

Cette quantification est très importante car c'est le préalable à toutes les démarches scientifiques de prévision et de dimensionnement. De plus l'étude des conséquences d'un événement climatique comme l'averse orageuse, le gel ou la sécheresse nécessite de le caractériser par un indice associant plusieurs données (température, précipitations, durée, ...). Nous en présenterons trois : érosivité d'une averse, indice de gel, indice de sécheresse. Les trois types d'événements climatiques étudiés en détail sont les averses dont les pluies sont particulièrement érosives, le gel qui peut perturber la texture et la structure des matériaux par gonflement et remaniement et les sécheresses qui induisent éventuellement le retrait et la fissuration.

L'approche fournie présente un caractère à la fois technique et générique. Elle ne donne en aucun cas une méthodologie d'étude systématique à mener en vue de la validation de la couverture d'un stockage particulier sur le plan de son comportement vis à vis des effets au sol des agents climatiques. Une telle méthodologie doit en effet, selon nous, être adaptée au contexte local et au projet particulier. Elle ne pourra être déterminée qu'après une hiérarchisation des différents problèmes posés par le stockage et sa couverture, menée dans le but de dégager les risques majeurs, qui ne sont pas forcément les plus immédiats. Pour mener à bien cette hiérarchisation pour la couverture, l'analyse climatologique qui déterminera les événements pertinents à considérer pour leurs effets au sol, d'une part, et l'analyse des caractéristiques d'altérabilité de ces matériaux de manière intrinsèque et dans des conditions de mise en œuvre, en réponse à ces événements, d'autre part, sont indispensables.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres.

Les deux premiers sont plus courts que les suivants car ils rappellent des informations tirées de la bibliographie. Le premier chapitre présente l'aspect qualitatif des effets au sol des événements climatiques extrêmes et fait apparaître en quoi l'érodabilité des sols, la gélivité des argiles et limons et leur retrait lors de la dessiccation sont des caractéristiques critiques vis à vis du rôle des matériaux au sein de la couverture. Le deuxième chapitre présente les aspects quantitatifs et législatifs de la gestion des déchets toxiques, radioactifs et des résidus miniers en France mais aussi quelques couvertures de stockages existantes ou possibles, ce qui clôture ce premier bilan.

Les trois derniers chapitres traitent chacun d'un type d'événement climatique, de sa quantification et de la quantification des effets de cet événement sur les sols composant éventuellement la couverture des stockages de déchets. Chacun de ces chapitres est conclu par un exemple d'application de la méthode de calcul proposé afin de rendre les méthodes plus explicites.

*Mais nous précisons que ces exemples ne sont pas des dimensionnements d'ouvrages et que les matériaux choisis pour les calculs, ne correspondent pas nécessairement à des matériaux employés sur des sites de stockage existants ou éventuels.*

Ainsi nous présentons, dans le troisième chapitre : l'évaluation des effets des averses érosives sur un site au climat méditerranéen du Sud de la France. Le quatrième chapitre est consacré à la quantification de l'épaisseur de sol affecté par le gel. Le site d'application principal est situé dans l'Est de la France. Ces deux chapitres présentent des méthodes de calculs existantes dans d'autres domaines de compétences : techniques agricoles ou routières et qui ont été adaptées aux problèmes posés par les couvertures de stockage de déchets.

Enfin le cinquième chapitre propose une méthode destinée à calculer l'épaisseur de sol affecté par une sécheresse. Comme cette méthode présente des aspects nouveaux, nous avons développé son élaboration et nous avons seulement donné un calcul d'application sur un site du Sud-Ouest de la France.

Les sites climatiques présentés ont été choisis en fonction de plusieurs critères : leurs caractéristiques climatiques particulières (violence des averses, rigueur des hivers ou aridité des étés) ; leur proximité avec de réels ou d'éventuels sites de stockage de déchets ou de résidus miniers ; la disponibilité des données météorologiques.

Ce mémoire propose donc des méthodes permettant de quantifier les effets d'événements climatiques "violents" sur les sols constituant les couvertures de stockage de déchets ou de résidus miniers. Nous avons choisi des événements millennaux car les données météorologiques disponibles en France autorisent leur extrapolation jusqu'à ce terme - extrapolation qui peut être assortie de confirmations historiques - mais qui au delà de 1000 ans n'est plus assez fiable. Il faut rappeler que dans ce cadre millennal ces événements peuvent se produire demain.

# Chapitre 1 - Effets au sol des événements climatiques

---

Ce chapitre est une revue des effets au sol des différents phénomènes climatiques. Son caractère volontairement descriptif apporte les bases nécessaires à la compréhension des chapitres 3, 4 et 5.

## 1. Effet à l'interface sol - atmosphère : érosion et impacts de foudre

### 1.1. *Erosion pluviale*

L'érosion externe des sols comprend le décapage et le lessivage superficiel des sols (érosion aréolaire) et leur ravinement (érosion linéaire) par les gouttes de pluie ou par les filets d'eau temporaires qui se concentrent pendant la pluie et, un certain temps, après la pluie. Le décapage entame la couche arable fertile du sol menaçant de la faire disparaître à terme. Le ravinement rend les sols impropres à la culture ou affouille les fondations des ouvrages d'art.

Les effets des précipitations sur les sols sont complexes et se composent de plusieurs termes : un terme cinétique, un terme statique, un terme chimique, etc., chaque terme ayant des conséquences à plusieurs échelles. Dans cette étude on se limite aux effets à l'échelle de la parcelle. Toutefois on notera pour mémoire l'organigramme, dressé par Y. Le Bissonnait (1988) qui résume clairement les phénomènes à l'échelle de l'agrégat (cf. figure 1.3).

A l'échelle de la parcelle, d'autres effets prédominent. Les gouttes de pluie brisent les mottes (phénomène de "splash"), projettent la terre en tout sens et réduisent la perméabilité du sol (battance). La fraction de l'eau qui ne s'infiltré pas commence par ruisseler selon la pente naturelle (ruissellement en nappe) pour rapidement se concentrer dans le modelé cultural, si la pente n'est pas trop forte et si ce modelé est suffisamment marqué. Lorsqu'il s'efface, il y a débordement et le ruissellement suit à nouveau la pente naturelle pour aboutir dans un nouveau collecteur. Ce ruissellement possède une énergie dont la déperdition permet l'érosion, tout d'abord érosion en nappe, puis érosion en rigoles. Sur la figure 1.1 l'ampleur de l'érosion dépend essentiellement de la pente des terrains. La photographie de la figure 1.2 prise à quelques kilomètres de celle de la figure 1.1 montre comment l'ampleur de l'érosion est également fortement dépendante de la nature des matériaux. En effet, suite à des averses semblables, l'érosion est plus importante sur des matériaux plus fins.

Le ruissellement après avoir circulé sur le versant se concentre dans les dépressions naturelles en provoquant le ravinement. Ce ravinement peut être temporaire s'il est susceptible d'être effacé par les travaux culturaux annuels, ou permanent lorsqu'il est suffisamment marqué pour nécessiter une intervention plus lourde de terrassement.

Selon des résultats déjà anciens (1962) mais obtenus sur un échantillon important, un tiers de la quantité de terre érodée est produit par des pluies de période de retour inférieure à 1 an, un tiers par des pluies de périodicité de 1 à 2 ans et un tiers pour une périodicité supérieure à 2 ans. L'érosion chronique est donc importante, tout en étant aggravée par les événements de type "catastrophique".

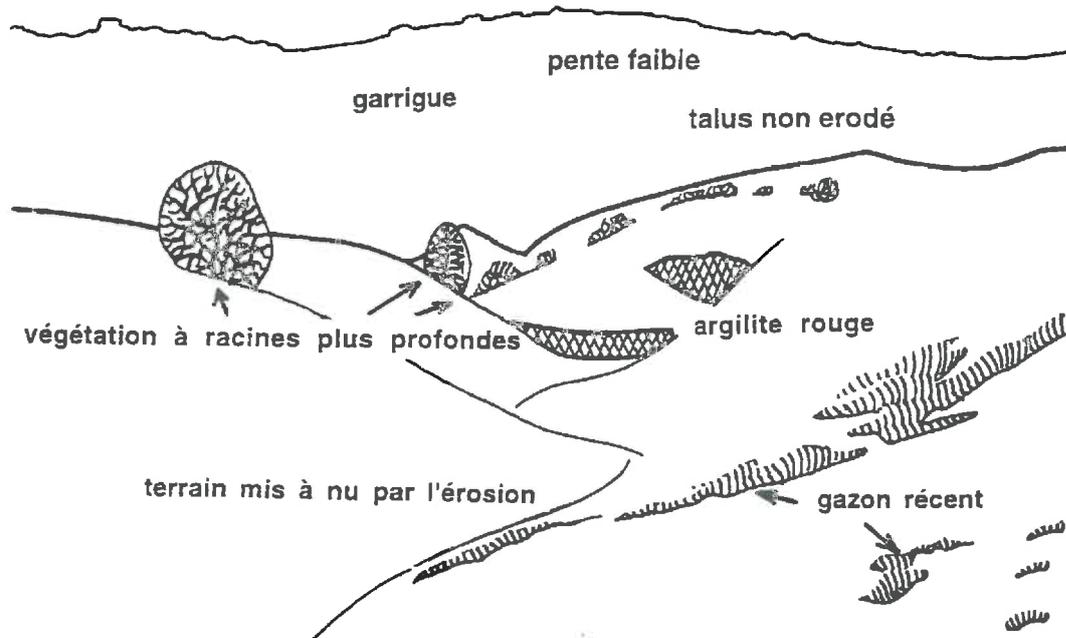


Figure 1. 1 : Erosion de versant sur des argilites rouges en climat méditerranéen



**Figure 1. 2 : Erosion sur des matériaux plus fins en climat méditerranéen**

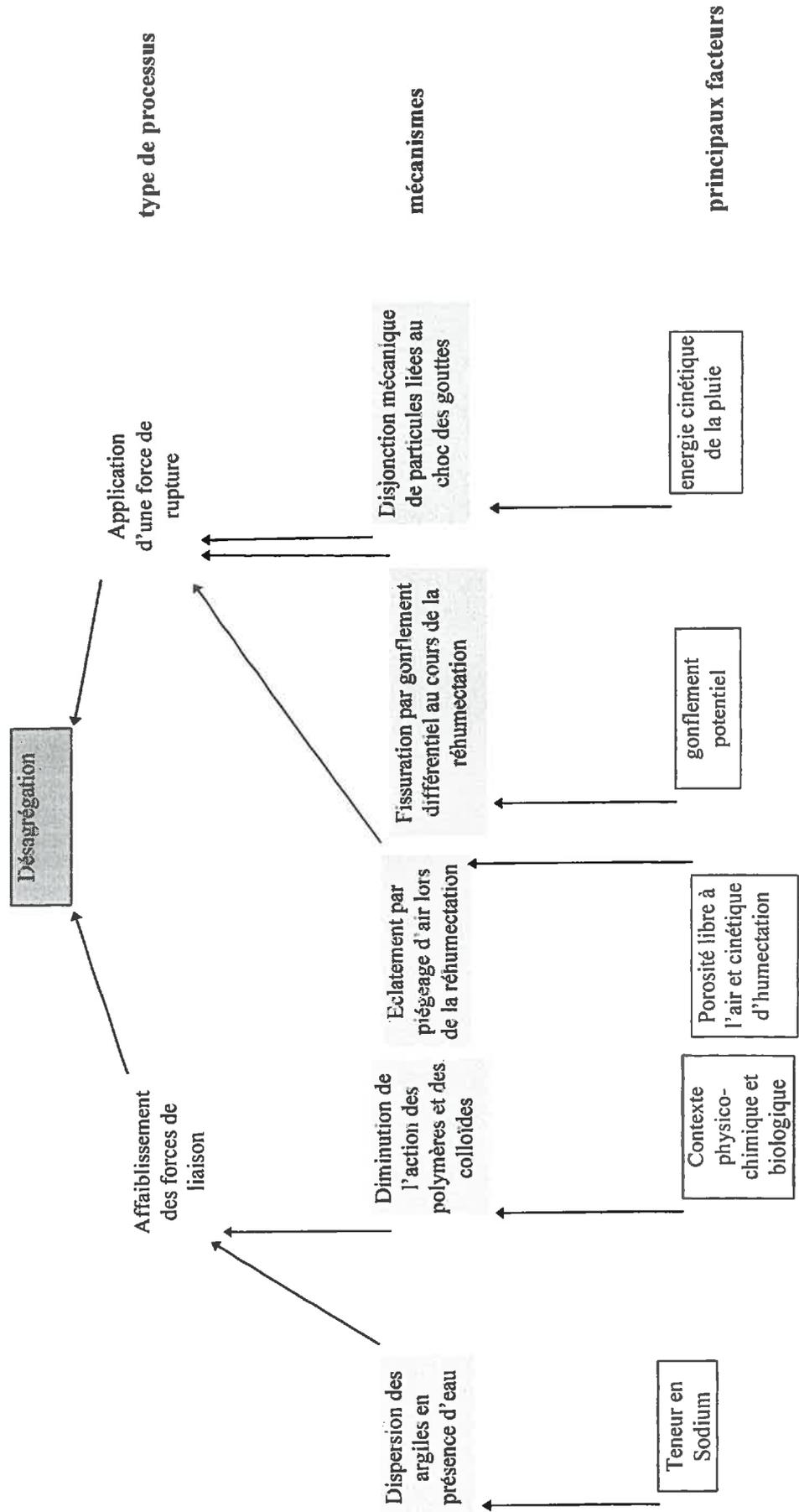


Figure 1. 3 : Différents mécanismes à l'origine de la division des agrégats par l'eau (d'après Y. Le Bissonnait, 1988)

Pour apprécier quantitativement l'érosion sur un territoire donné, certains auteurs apprécient la turbidité d'une rivière à l'aval de son bassin versant et rapportent les quantités exportées à l'ensemble du bassin (cf. tableau 1.1).

**Tableau 1. 1 : Erosion annuelle dans divers bassins versants (d'après Hénensal, 1987)**

Auteurs - date	Climat	Bassins	Erosion annuelle
Nebois 1983	semi-tropical	au Lesotho >100 km <sup>2</sup>	0,2 à 2 kg.m <sup>-2</sup>
Fournier 1972	tempéré océanique	Seine	17 g.m <sup>-2</sup>
Bolline 1978	tempéré océanique frais	Meuse à Liège	12 g.m <sup>-2</sup>
Bolline 1978	tempéré océanique frais	Escaut à Gand	38 g.m <sup>-2</sup>
Probst 1986	tempéré océanique	Girou (Toulouse)	27 g.m <sup>-2</sup> en suspension 95 g.m <sup>-2</sup> en dissolution

Ces chiffres sont à la fois modestes et trompeurs. Modestes car 150 g.m<sup>-2</sup> représente une couche de l'ordre de 0,1 mm presque invisible. Trompeurs parce que la majeure partie des exportations est due à une portion souvent très faible du bassin. Localement l'érosion peut atteindre des valeurs inquiétantes qui dépassent la limite de 1,1 kg.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> (soit 11 t.hec<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) au delà de laquelle il n'y a plus de régénération possible des sols d'après de nombreux auteurs. D'autres auteurs pensent qu'au delà de 4 t.hec<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> les cultures ne sont plus possibles. Mais par des mesures plus ponctuelles on note des valeurs plus importantes (cf. tableau 1.2).

**Tableau 1. 2 : Erosions ponctuelles**

Auteurs - date	Climat	lieu	Erosion
Schwing 1978	tempéré océanique frais	vignobles alsaciens de pente 17%	7 kg.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup>
Combes 1981	tempéré océanique	Durance à Sisteron terrain montagneux	10,5 kg.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup>
Schwing 1978	orage violent de période de retour 25 ans	vignobles alsaciens de pente 17%	52 kg.m <sup>-2</sup>
Meyer 1978	tempéré océanique	talus autoroutiers	90 kg.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup>
Starkel 1976	mousson	Inde pente de 30%	300 kg.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup>

## 1.2. Erosion éolienne

Bien qu'on ne leur attribue généralement de gravité que dans les régions arides ou semi-arides, les phénomènes d'érosion éolienne peuvent se produire n'importe où dès que les conditions de sol, de climat et de végétation leur offrent un terrain favorable, c'est à dire :

- que le sol est meuble, sec, et assez finement émiétté ;
- que la surface du sol est relativement égale et la couverture végétale absente ou clairsemée ;
- que la "parcelle" est suffisamment étendue ;
- que le vent est suffisamment fort pour amorcer un mouvement de particules.

Si cet ensemble de conditions se trouve le plus souvent réuni dans les régions semi-arides, on peut également le rencontrer dans les régions sub-humides ou même humides. Des terrains

sableux recevant 750 mm de pluie annuelle peuvent être endommagés par l'érosion éolienne. Les terrains tourbeux même convenablement arrosés, requièrent parfois une protection particulière. Enfin, la défense des bandes littorales pose des problèmes difficiles, même dans des régions très pluvieuses.

Les secteurs les plus vulnérables ont en commun trois caractères : un déficit récurrent d'humidité qui limite la croissance végétale, des vents modérés à forts aux époques où le sol reste nu ou demeure mal protégé par de trop jeunes plantes, enfin une prédominance de terrains contenant une importante fraction sableuse.

Parmi les dommages causés par l'érosion éolienne (tempêtes de poussière, fossés ensablés...) le plus grave est le changement apporté à la composition du sol. En effet les fractions les plus fines sont entraînées par le vent, ne laissant derrière elles que les éléments les plus grossiers. Cette ségrégation dépouille le sol de ses constituants les plus utiles du point de vue de la productivité et de la rétention en eau et le rend également plus sableux, donc plus sensible à l'érosion éolienne que le sol primitif.

Le mouvement des particules de terre est déterminé par les forces éoliennes qui s'exercent à la surface du sol. Le vent qui se déplace au dessus de cette surface y circule d'autant plus vite que l'on s'éloigne du sol, la vitesse augmentant en proportion du logarithme de la hauteur. C'est cette courbe de vélocité qui détermine l'intensité de la force exercée. A ras de terre, c'est à dire entre 0,03 et 2,5 mm pour une surface à peu près plane, la vitesse du vent est nulle. Sur une très faible hauteur au dessus de ce niveau, la circulation de l'air est régulière ou laminaire; plus haut, on rencontre la couche turbulente qui engendre les forces entraînant le mouvement du sol. Pour une surface de configuration donnée, la hauteur de la couche d'air immobile reste constante, quelle que soit la turbulence du vent. Il y a création d'une couche turbulente supérieure dès lors que la vitesse du vent dépasse 2 à 3 km.h<sup>-1</sup>.

Le minimum de vélocité éolienne requis pour amorcer le mouvement des particules les plus sensibles à l'érosion - celles qui mesurent environ 0,1 mm de diamètre - est d'à peu près 15 km. h<sup>-1</sup> à la hauteur de 30 cm au dessus du sol. Dans les terrains qui présentent un mélange d'agrégats de dimensions diverses ce minimum de vélocité passe à 20 km.h<sup>-1</sup> (à 30 cm au dessus du sol).

Le transport des particules mises en mouvement par le vent peut s'opérer de trois façons différentes. Dans la saltation, mode dominant, les particules avancent par sauts successifs. Les particules sujettes à ce mode ont un diamètre allant de 0,05 à 0,5 mm. Pour la reptation en surface, les particules de plus grande dimension (leur diamètre varie entre 0,5 et 2 mm) roulent ou glissent à ras de terre. Trop lourdes pour être soulevées par le vent, elles sont mises en mouvement par l'impact des particules en saltation. La suspension, troisième mode de déplacement, correspond au flottement dans l'air de particules fines dont le mouvement est également déclenché par l'impact des particules en saltation. Une fois parvenues dans la couche turbulente, elles peuvent être soulevées à très grande hauteur par les courants ascendants qui les emportent souvent à des kilomètres.

Lorsque les grains de terre ont été libérés et que le mouvement du sol est amorcé, l'impact des particules en saltation exerce sur la surface une forte action abrasive. Cette abrasion désagrège les mottes, détruit les croûtes stables, use les résidus végétaux et abîme les plantes vivantes. En conséquence, à mesure que le processus gagne du terrain, le nombre de particules mises en mouvement s'accroît. C'est ce qu'on appelle un effet "en boule de neige". Cette forme d'érosion peut être importante, toutefois en France métropolitaine ce phénomène est plus limité. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas en tenir compte par la suite.

### **1.3. Impacts de foudre**

D'après J.C. Revel (1985), les impacts de foudre dans les roches et les sables sont marqués par des traces de fusion. Sur les roches, ces traces se présentent comme des coulées de matière fondue sur leur surface, dans les fissures ou dans des perforations. Plus rarement des blocs de roches peuvent exploser sans aucune fusion. Dans les sables siliceux, la foudre produit des fulgurites (tubes entourés de silice fondue). Cette gaine de quelques millimètres de diamètre inclut des vésicules, plus nombreuses vers la surface.

Dans les sols, les impacts de foudre se manifestent sous la forme de canaux parfois ramifiés, le diamètre de ces canaux est de l'ordre du centimètre voire du décimètre sur une longueur pouvant atteindre plusieurs mètres si le sol est sec. Leur direction est horizontale ou verticale si un réseau de racines se développe dans ce sens.

Le principal effet de la foudre tombant sur le sol est une brusque élévation de température, fonction des caractéristiques du coup de foudre, de la résistivité du sol et donc de son humidité. En conséquence, la dilatation rapide de l'air ou de l'eau vaporisée provoque une véritable explosion, un canal est creusé sur le trajet de la décharge et des particules argileuses sont fondues sur une très faible épaisseur. Ces impacts sont intéressants du point de vue scientifique mais leur nombre évalué par la société Météorage n'est pas de nature à remettre en cause la pérennité des couvertures de stockage de déchets. Pour cette raison nous n'en tiendrons plus compte par la suite.

## **2. Effets du gel**

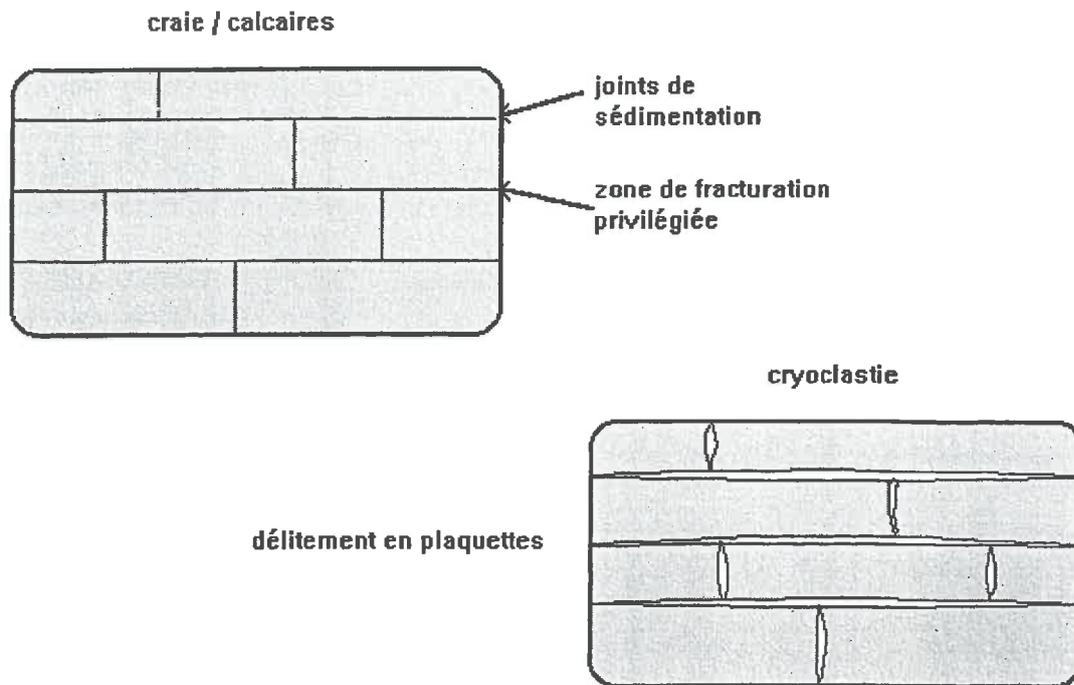
### **2.1. Effets sur les matériaux poreux et fracturés : gélifraction**

L'essentiel du phénomène de gélifraction repose sur le fait qu'une quantité d'eau a un volume supérieur à l'état solide (glace) qu'à l'état liquide. Pour l'eau pure ce rapport de volume est à 0 °C de 1,09. On comprend alors qu'une zone d'accumulation d'eau à l'état liquide sera un lieu privilégié de fracturation (cf. fig. 1.4). Ce phénomène est également lié à la thermoclastie : c'est la fracturation liée aux variations diurnes de température du fait des variations volumiques différentielles dans les roches (dilatation - retraction). La puissance de ces 2 phénomènes réside dans la répétition quotidienne des efforts sur les matériaux.

### **2.2. Effet sur les limons et argiles compactées : gonflement**

#### **2.2.1. Principe général**

La cryosuccion qui apparaît dans les sols gelés entraîne un écoulement d'eau vers la zone de congélation (cf. fig. 1.5). Cette eau en mouvement s'accumule et fini par geler, avec formation de lentilles de glace et augmentation de volume. Cette augmentation de volume constitue le gonflement. L'importance de ce phénomène dépend de la composition et de la granulométrie des sols (Frémond - Williams, 1977)



**Figure 1. 4 : Principe du phénomène de cryoclastie**

En règle générale, plus le sol est fin et plus les cryosuccions sont importantes. Quand le gel est prolongé et quand le sol gelé est relativement perméable, la cryosuccion est plus grande là où les températures sont les plus basses.

Dans les sols à particules de plus grande taille, on trouve très peu d'eau non gelée et la cryosuccion existe seulement aux limites de l'interface sol gelé / sol non gelé.

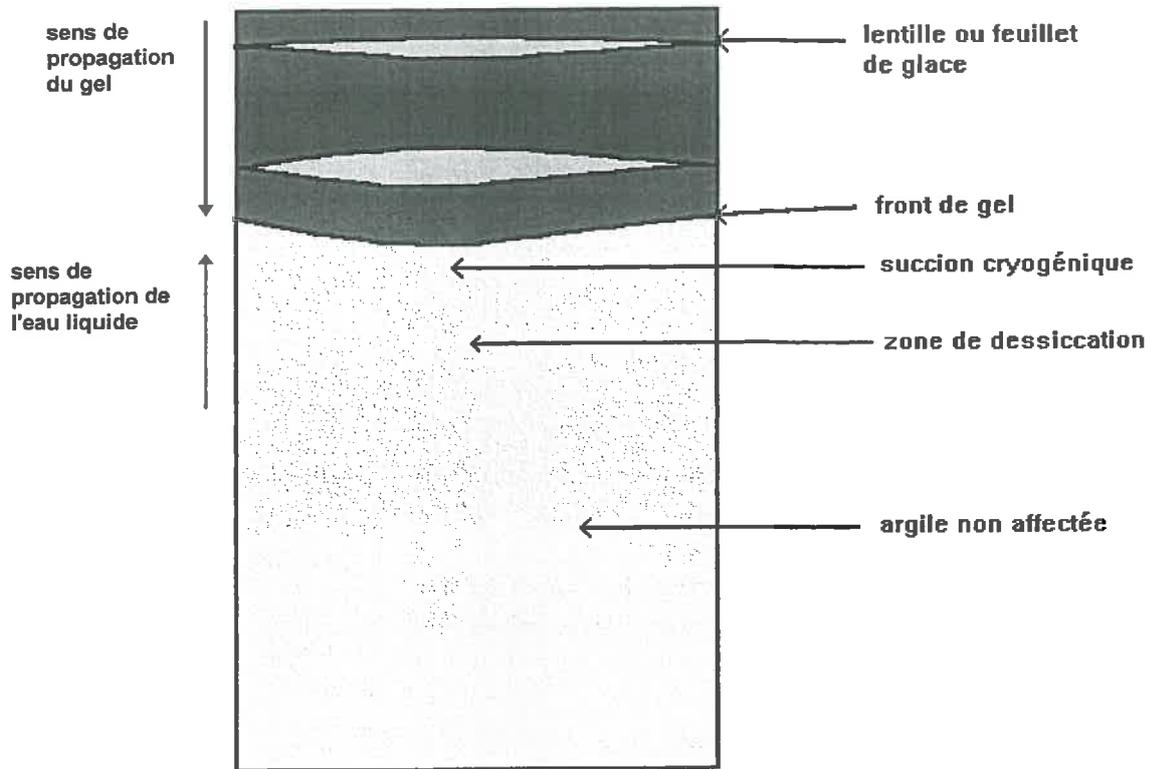
Dans les sols à grains très fins, le gonflement est généralement limité du fait de la très faible perméabilité de ces sols.

### 2.2.2. Détail du phénomène

Dans un sol fin, lorsque la température descend en dessous de 0 °C, une partie de l'eau interstitielle gèle. Pour un limon, lorsque la température descend jusqu'à - 1 °C, la teneur en eau pondérale non gelée passe de 20 % à environ 10 % faisant passer la succion capillaire de 5 kPa à plus de 100 kPa. Dans le cas des limons, les lentilles de glace se forment à partir de l'eau qui est aspirée en direction du front de gel (cf. fig. 1.5). Lorsqu'un limon se congèle, il présente une modification de structure, une augmentation de la teneur en eau et un gonflement important. Au dégel, tant que l'excès d'eau n'est pas éliminé ses qualités sont altérées (de Los Cobos, 1994)

Sur des argiles compactées, Benson (1995) montre que la conductivité hydraulique est nettement augmentée par un ou quelques cycles de gel - dégel. Cette augmentation est causée par une micro fissuration des argiles qui résulte de la formation de lentilles de glace et de dessiccation le long du front de gel. Sur des argiles compactées de conductivité initiale

d'environ  $1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ , après 4 cycles de gel - dégel, la conductivité hydraulique est de  $7 \cdot 10^{-9} \text{ à } 6 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ . Ses expérimentations montrent également la similitude entre les tests de laboratoire et une planche d'essai.



**Figure 1. 5 : Principe du phénomène de gonflement au gel**

De plus, le gel modifie les sols compressibles de manière permanente. Les forces de cryosuction engendrées soumettent le sol à des pressions très fortes qui consolident les parties de ce sol situées entre les couches de glace. Après le dégel on assiste à un phénomène de préconsolidation de ces sols qui présentent une structure friable de feuillets fortement consolidés.

### **2.3. Remaniement de matériaux**

Les 2 phénomènes : gélifraction et gonflement sont associés dans un phénomène de plus grande ampleur qui affecte une partie de l'Est de la France. En effet pendant les glaciations quaternaires, le sol de cette région a été gelé en continu (été et hiver) à une profondeur de quelques dizaines de mètres. Hors, l'été, la partie superficielle dégelait, comme l'eau ne pouvait pas s'infiltrer, la partie supérieure du sol perdait sa cohésion et du fait de la différence de densité entre les différents matériaux constitutifs du sol, de la pente et des flux thermiques, tout l'horizon supérieur a été remanié comme le montre la photographie de la figure 1.6.

L'intérêt de ce phénomène dans le cadre de notre étude est surtout de montrer comment les événements climatiques peuvent engendrer des effets dans le sol à une échelle verticale décimétrique voire métrique.

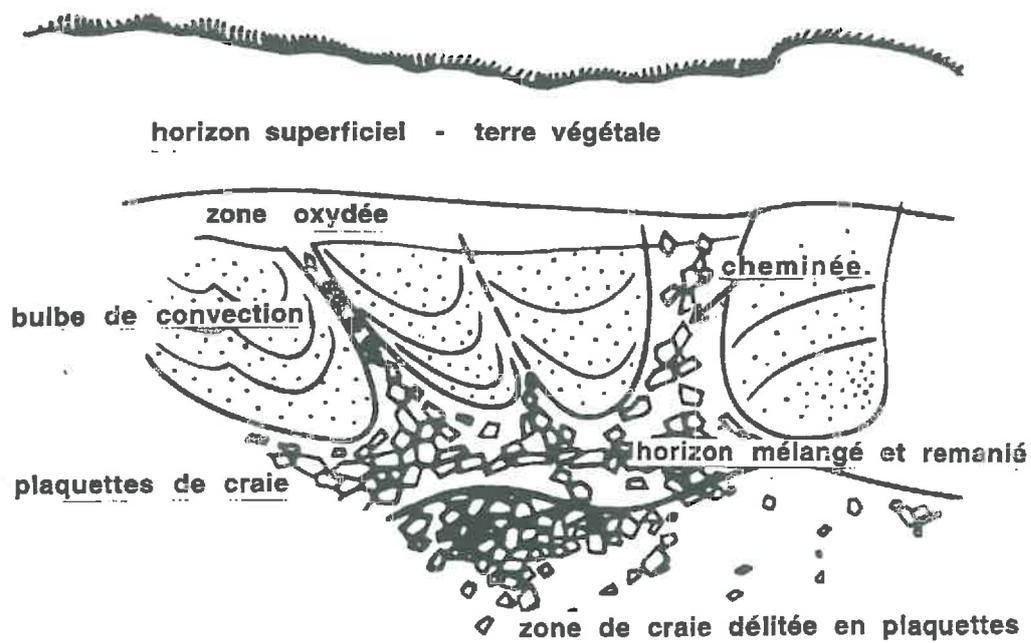


Figure 1. 6: Bulbes de convection dans l'Est de la France

### 3. Effets liés à la dessiccation

Le schéma de la figure 1.7 présentent les aspects multiples de la dessiccation des sols. Le retrait et la fissuration sont présentés dans les paragraphes 3.1 et 3.2.

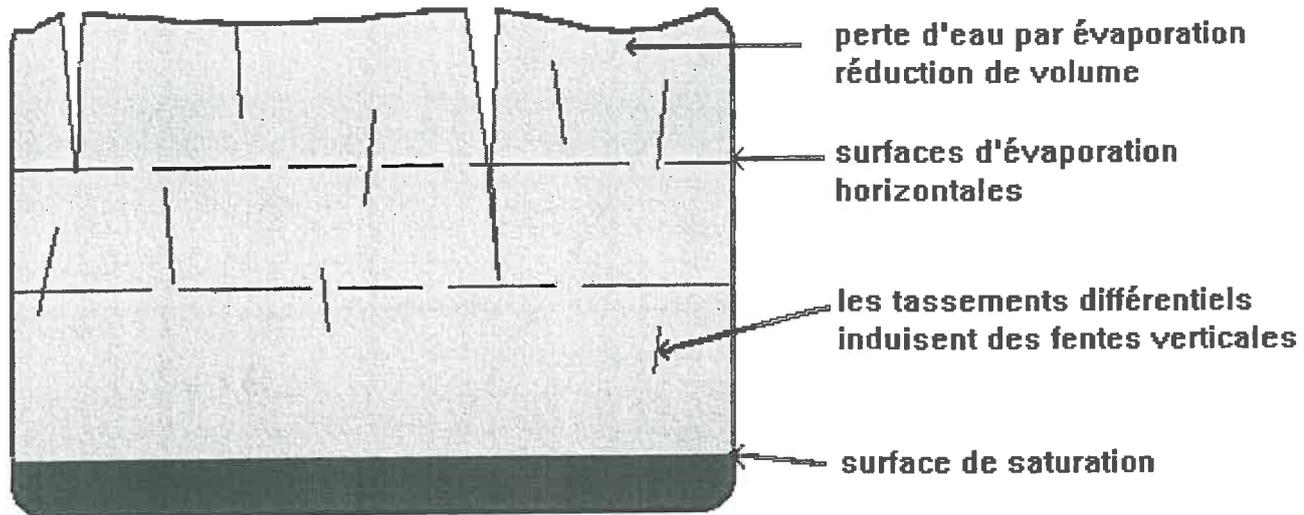


Figure 1. 7 : Schématisation des phénomènes de retrait et de fissuration sur un sol argileux

#### 3.1. Retrait

En fonction des teneurs en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait. En réalité, le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par les limites d'Atterberg. Ce sont des teneurs en eau (poids de l'eau / poids du sol sec). Pour les obtenir, les essais sont effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,42 mm.

La limite de retrait :  $w_r$  est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal. Sur un graphique indiquant la variation de volume relative en fonction de la teneur en eau,  $w_r$  est à l'intersection des 2 tangentes (cf. figure 1.8). Cette limite de retrait est caractéristique du sol.

Un sol homogène à l'équilibre a une courbe d'humidité en fonction de la profondeur qui est sigmoïde. Cette courbe est comparable à la courbe succion - teneur en eau présentée à la figure 1.9 avec toutefois des ordonnées linéaires et non logarithmiques. Ainsi en supposant un sol argileux à l'équilibre et une surface de saturation à 3 m de profondeur, on aura alors en surface une succion de 3 m. Entre ces 2 surfaces, les succions seront linéaires et les teneurs en eau correspondantes ne dépendront que de la courbe caractéristique du sol considéré.

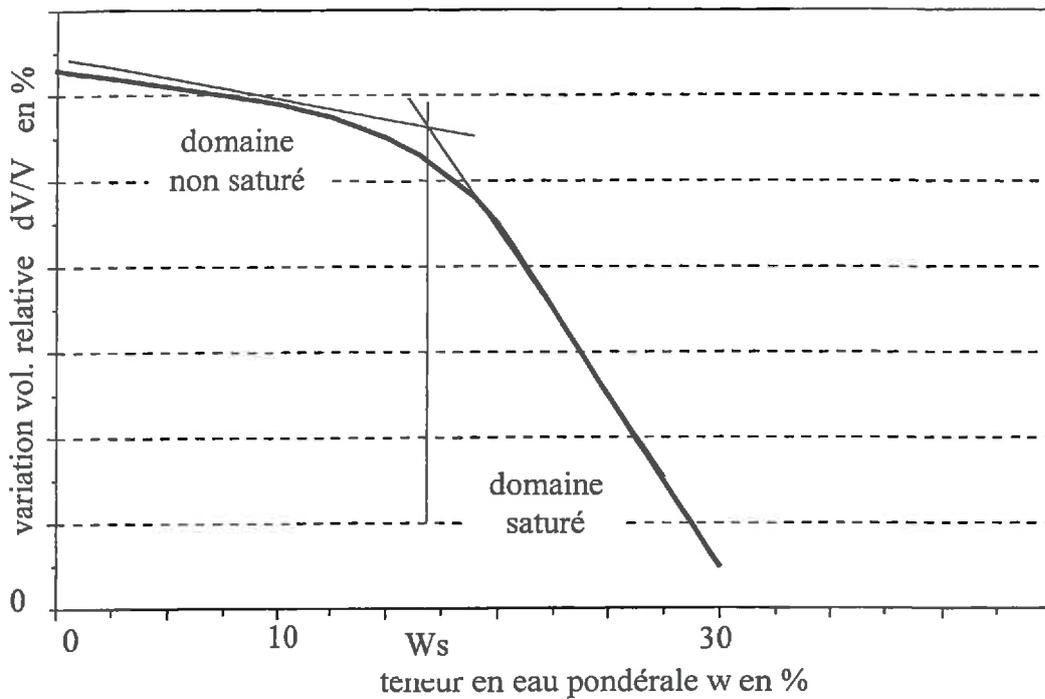


Figure 1. 8 : Limite de retrait d'Atterberg

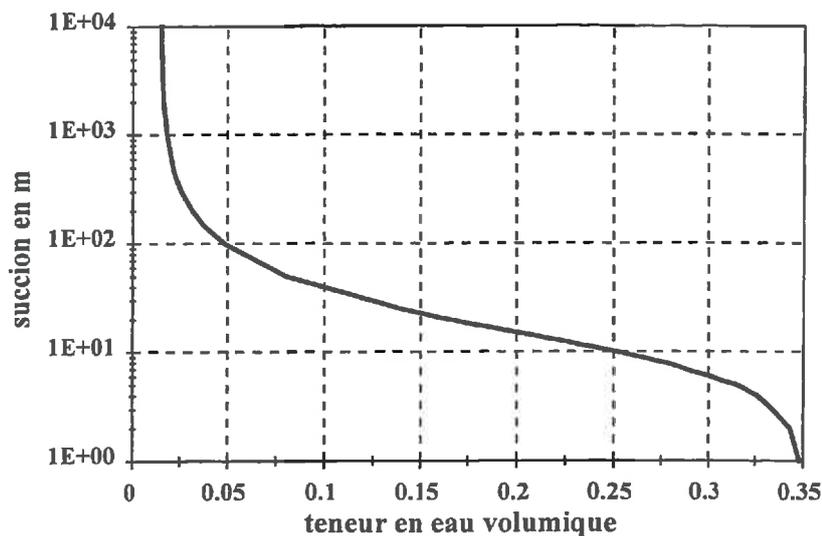


Figure 1. 9 : Relation succion - teneur en eau théorique d'un sol fin type

Cette relation n'est pas biunivoque. En effet si on essaie de l'obtenir expérimentalement par dessiccation ou par imbibition les courbes résultats ne seront pas superposables. De plus la courbe en dessiccation sera au-dessus de celle en imbibition. Cet hysteresis est attribué à plusieurs facteurs (Hillel, 1984). Tout d'abord, la non uniformité géométrique des pores individuels aboutit à l'effet « bouteille d'encre ». Egalement il y a l'effet de l'angle de contact entre l'eau et les grains (le rayon de courbure d'un ménisque qui avance est supérieur à celui

d'un ménisque qui recule). Enfin la présence d'air piégé tend à réduire la teneur en eau des sols fraîchement mouillés.

Dans notre étude numérique du chapitre 5, nous ne nous préoccupons pas de l'effet d'hysteresis. Ceci se justifie par le fait que nous ne considérerons dans la définition de l'indice de sécheresse que le phénomène de dessiccation. Par contre dans les applications, il y aura des réimbibitions partielles.

On remarque que le retrait semble avoir une limite qui dépend fortement du matériau considéré (nature, texture), mais que cette limite ne dépend pas des contraintes "climatiques". Ainsi ce phénomène et son extrême sont accessibles par des tests de laboratoire qui ne nécessitent pas la prise en compte des paramètres climatiques. Par contre l'épaisseur de sol affectée par les phénomènes de retrait est fonction des conditions climatiques mais aussi de la pente et du couvert végétal.

Du point de vue quantitatif, il n'y a pas actuellement d'essai de retrait normalisé à l'exception des limites d'Atterberg. Certains essais normalisés permettent toutefois d'évaluer la sensibilité des sols aux phénomènes de retrait ou de gonflement. Enfin plusieurs études récentes ont débouché sur d'autres modes opératoires intéressants.

## **3.2. Fissuration**

### 3.2.1. Principe général

Au moment où un sol argileux se dessèche, les constituants de la structure adhèrent les uns aux autres. Il se produit alors des tensions provoquant la rupture du terrain. Dans un milieu isotrope, les tensions étant généralement égales en tout sens, la rupture se produit de telle façon que les tensions soient supprimées dans toutes les directions. On voit alors que le système de fissures aboutissant à ce résultat est constitué par une étoile formée de trois fissures faisant entre elles des angles de  $120^\circ$ . Lorsque la dessiccation continue, les tensions deviennent supérieures aux forces de liaison et sont alors orientées. Des ruptures apparaissent perpendiculairement au réseau de fissures primaires, elles constituent ainsi un réseau secondaire.

Le nombre de ces réseaux dépend de l'importance du retrait et des petites hétérogénéités. Il semble, d'après de Los Cobos (1994), que le retrait est d'autant plus important que les teneurs en argile et en matière organique sont élevées. De plus le retrait est fonction de la nature des argiles : maximal pour la montmorillonite et minimal pour la kaolinite.

Si l'on tient compte de la perméabilité des massifs comme cela doit être le cas à l'échelle d'un ouvrage, les phénomènes de dessiccation sont extrêmement néfastes. Ils entraînent des fractures de retrait qui créent des cheminements préférentiels pour l'écoulement. Les fentes de dessiccation peuvent également se remplir de matériau plus grossier, rendant irréversible l'augmentation de perméabilité.

### 3.2.2. Détail du phénomène

De nombreux auteurs ont essayé de quantifier les dimensions des fissures. Parmi eux, Morris et al. (1992) ont montré par différents calculs (calcul en élasticité linéaire, rupture en traction ou en cisaillement) que la profondeur de la fissure :  $Z_c$ , est de la forme de :

$$Z_c = \frac{S_o}{\frac{S_o}{W} + E}$$

avec  $S_o$  : succion à la surface du sol

$W$  : profondeur de la zone saturée

$E$  : coefficient dépendant des caractéristiques mécaniques du sol (coefficient de Poisson, cohésion, angle de frottement, poids).

Mais selon les hypothèses choisies : matériaux isotrope, absence de cohésion effective, etc, les résultats sont plus ou moins proches des mesures in situ, assez difficiles à obtenir sans altérer les échantillons.

## Chapitre 2 - Couvertures de stockages de déchets

---

La couverture d'un stockage de déchets doit répondre à différentes contraintes : contraintes techniques d'efficacité et d'exploitation en continu du stockage par exemple, contraintes économiques, contraintes législatives et réglementaires. La réglementation est la même partout en France. L'efficacité à long terme de la couverture va dépendre fortement du climat qui est varié en fonction de la région et de l'altitude. Enfin le contexte économique dépend essentiellement de la proximité des lieux de production des déchets.

Ce chapitre rappelle tout d'abord le contexte juridique actuel des déchets et des différents centres de stockage superficiel de déchets en France. Ce contexte dépend fortement du type de déchet considéré. Toutefois la couverture de son stockage aura le même objectif : isoler les déchets stockés des atteintes environnementales extérieures. Nous montrerons, à la fin de ce chapitre, des dispositifs adoptés pour atteindre cet objectif commun.

### 1. Différents types de matériaux

La définition légale d'un déchet n'est pas unique. En effet selon la loi française [*n°75-633 du 15/07/1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux*] est considéré comme déchet : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance ou matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Sur ces déchets seuls sont réglementés ceux qui sont, par leur condition de production ou de détention, « de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement ».

Selon la législation européenne [*directive du conseil n°75/442/CEE du 15/07/1975 relative aux déchets*] est considéré comme déchet : « toute substance ou tout objet qui relève des catégories figurant à l'annexe n°1 et dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire. »

Dans cette annexe n°1 on trouve entre autres : « Résidu d'extraction et de préparation des matières premières (par exemple résidus d'exploitation minière ou pétrolière, ... ) ».

Toutefois la directive du 15/07/1975 précise que « sont exclus du champs d'application de la présente les déchets déjà couverts par une autre législation et notamment :

- les déchets radioactifs;
- les déchets résultant de la prospection, de l'extraction du traitement ou du stockage de ressources minérales ainsi que de l'exploitation des carrières. »

#### 1.1. Déchets toxiques

Ce sont d'après l'arrêté du 18/12/1992, « des déchets industriels spéciaux ultimes résultant ou non de traitement de déchets qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux . De tels déchets sont essentiellement

solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds, peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, très peu solubles.»

Ce sont, par exemple, des poussières, fines et cendres volantes, boues d'usinage, résidus de stations d'épuration d'eaux industrielles, catalyseurs usés...

La production française de ces déchets était en 1989 de 617 000 tonnes. an<sup>-1</sup>.

### **1.2. Déchets radioactifs**

On rappelle que le becquerel (Bq) correspond à la désintégration de 1 atome par seconde. A titre de référence, nous citerons la radioactivité naturelle (avant implantation du stockage de déchets) des végétaux autour du Centre de l'Aube était d'environ 600 Bq par kg d'herbe sèche. Elle provenait du potassium 42 (groupe II-B) et du béryllium 7 (groupe II-B).

Aux termes d'un avis français publié le 6 juin 1970 par le Ministère de la santé, « sont réputés radioactifs les déchets :

- dont l'activité massique est supérieure à 2 microcuries par kilogramme (soit 74 MBq);
- dont l'activité totale est supérieure
  - à 0,1 microcurie (soit 3,7 MBq) pour les radioéléments du groupe I
  - à 1 microcurie (soit 37 MBq) pour les radioéléments du groupe II A
  - à 10 microcuries (soit 370 MBq) pour les radioéléments du groupe II B
  - à 100 microcuries (soit 3700 MBq) pour les radioéléments du groupe III. »(Ces groupes sont définis à l'avis)

La production française était en 1995 d'environ 22 000 m<sup>3</sup>.an<sup>-1</sup> pour les déchets à vie courte de faible et moyenne activité qui sont stockés en surface. Ce sont par exemples des gants et combinaisons de manutention, du matériel médical ou de laboratoire etc.

### **1.3. Déchets miniers**

De nombreuses mines sont concernées par le problème du stockage des résidus d'exploitation ou de traitement de minerais. Nous nous sommes limités aux problèmes posés par les mines d'uranium. Ces mines sont parfois associées, sur la même implantation, à une usine de traitement du minerai afin de concentrer les produits d'extraction.

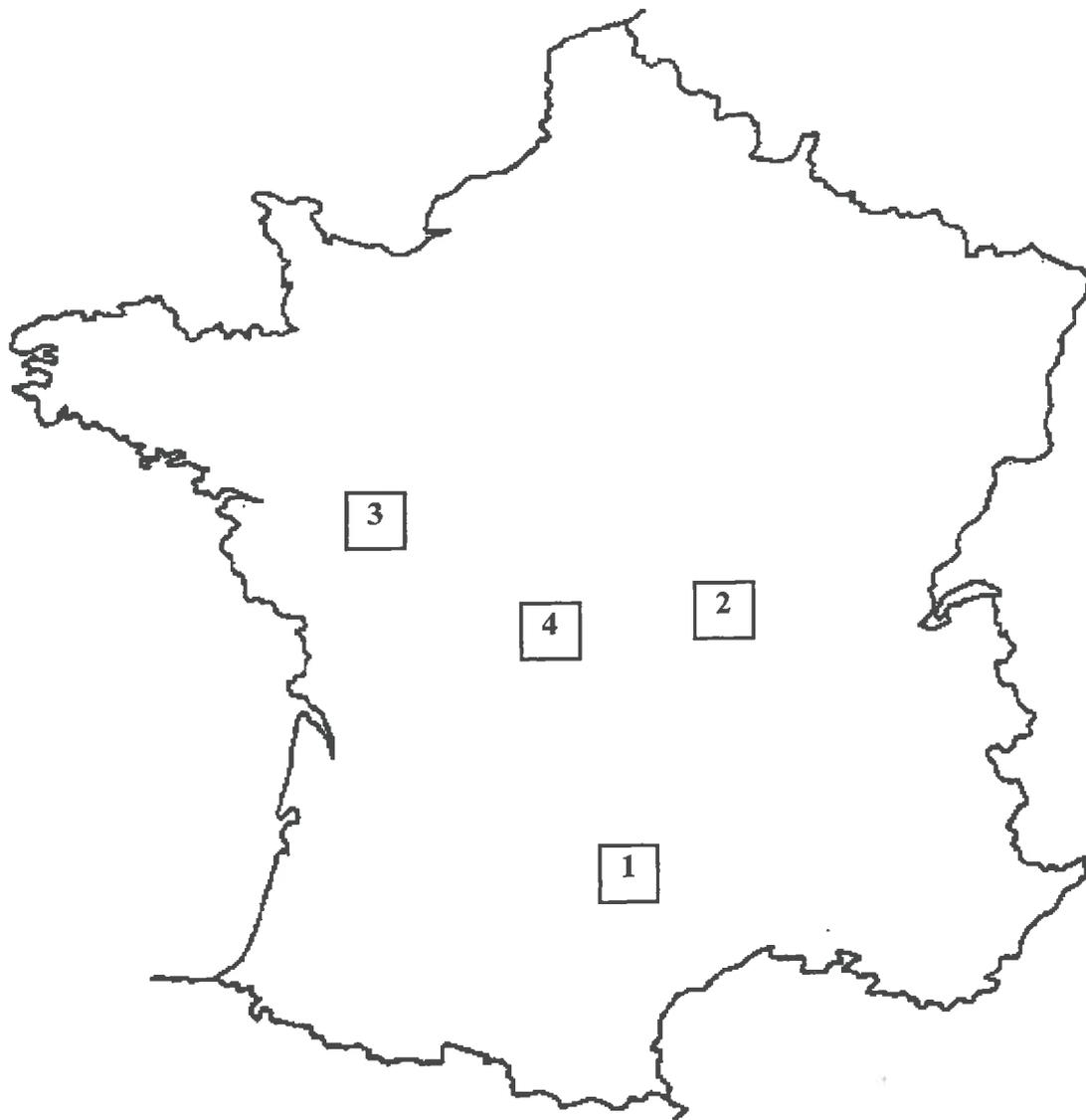
Les déchets miniers comprennent 2 catégories principales : les déchets d'exploitation, de loin les plus abondants, essentiellement des stériles ; des résidus de traitement du minerai, éventuellement toxiques. Nous nous intéresserons plus particulièrement à ces derniers.

Le processus d'exploitation de Bessines (Haute-Vienne), par exemple, se déroule en plusieurs étapes. En tête d'usine, le minerai est concassé puis broyé jusqu'à la maille libératoire de 500 µm. Une attaque chloro-acide permet ensuite de mettre l'uranium en solution, il reste alors un résidu solide dont la granulométrie maximale est de 0,6 mm et qui contient encore 100 g.t<sup>-1</sup> d'Uranium, 20 g.t<sup>-1</sup> de Thorium et 0,6 g.t<sup>-1</sup> de Radium. L'activité massique des résidus miniers à Bessines est de l'ordre de 240 kBq.kg<sup>-1</sup>. D'autres résidus, de granulométrie différente peuvent être produits par lessivage statique par exemple.

Nous présentons sur la figure 2.1, la localisation géographique des principales mines d'uranium françaises. Cette localisation est liée à la géologie. Seuls 5 sites de stockage de

résidus sur les 22 existants en France sont indiqués sur la figure 2.1. Ils font partie des plus importants en volume.

On notera que certaines de ces mines sont à une altitude importante, par exemple la mine des Bois Noirs est située entre 700 et 800 m d'altitude. Le climat local y est plus contrasté qu'en plaine.



**Figure 2. 1 : Localisation des Mines d'Uranium Françaises citées**

**Légende : liste des Mines d'Uranium Françaises (liste non exhaustive)**

<b>n° sur la carte</b>	<b>Nom de la Mine</b>	<b>Département</b>
1	St Martin du Bosc	Hérault
2	Bois Noirs	Loire
3	Ecarpière	Loire-Atlantique
4	Bessines	Haute-Vienne
4	Jouac	Haute-Vienne

Du point de vue quantitatif, nous citerons à titre d'exemple le cas de l'usine de Bessines (Croisat, 1996) qui a généré 13,7 millions de tonnes de résidus qui sont répartis sur 4 aires de stockage : Montmassacrot (0,7 Mt sur 3 hectares) ; Lavaugrasse (5,7 Mt sur 20 hectares) ; Brugeaud (5,8 Mt sur 10 hectares) ; Bellezanne (1,5 Mt sur 6 hectares).

Les différentes répartitions dépendent de la configuration des sites (digues, fosses etc.).

## 2. Aspects législatifs des stockages de déchets

Les déchets autres que miniers ou radioactifs relèvent de la loi française n°76/663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement puisque : « sont soumis aux dispositions de la présente loi les usines, ateliers, dépôts, chantiers et d'une manière générale les installations exploitées ou détenues par ... qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature ou de l'environnement... ».

Les centres de stockage sont soit des décharges et stockages de classe II, des décharges et stockages de classe I.

### 2.1. Installations classées

Les centres de stockage de déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés - Centres d'Enfouissement Technique de classe I -, existants, relèvent de l'arrêté du 18/12/1992 qui définit parfaitement les règles d'admission des déchets, d'exploitation, de réaménagement du site et de contrôle et suivi.

On notera pour mémoire quelques phrases issues de cet arrêté :

« l'objectif est d'assurer l'isolement définitif du site vis à vis des eaux de pluie,..., de garantir un devenir à long terme compatible avec la présence de déchets, ... »

« Une couverture finale est mise en place pour empêcher l'infiltration d'eau de pluie ou de ruissellement vers l'intérieur de l'installation de stockage.»

« La couverture présente une pente de 5 % et doit être conçue de manière à prévenir les risques d'érosion.

« La couverture a une structure multicouche et comprend au minimum (du haut vers le bas)

- une couche d'au moins 0,3 m d'épaisseur de terre arable végétalisée permettant le développement d'une végétation favorisant une évapo-transpiration maximum ;
- un niveau drainant d'un coefficient de perméabilité supérieur à  $1.10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup> dans lequel sont incorporé des drains collecteurs ;
- un écran imperméable composé d'une géomembrane et d'une couche de matériaux d'au moins 1 m de puissance caractérisée par un coefficient de perméabilité de  $1.10^{-9}$  m.s<sup>-1</sup> ;
- une couche drainante permettant la mise en dépression de la décharge en liaison avec des événements. »

Les nouveaux centres de stockage de déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés relèvent également de l'arrêté du 18/12/1992 qui définit parfaitement les règles d'admission des déchets, d'implantation et d'aménagement du site avant l'exploitation, d'exploitation, de réaménagement du site, de contrôle et de suivi. Ces règles ressemblent à celles des installations existantes pour les points mentionnés ci-dessus.

Il y a actuellement en France 12 sites de stockages en cours d'exploitation (cf. figure 2.2). Quelques autres sont encore en projet dont un dans le département de la Dordogne (n°13 sur la figure).

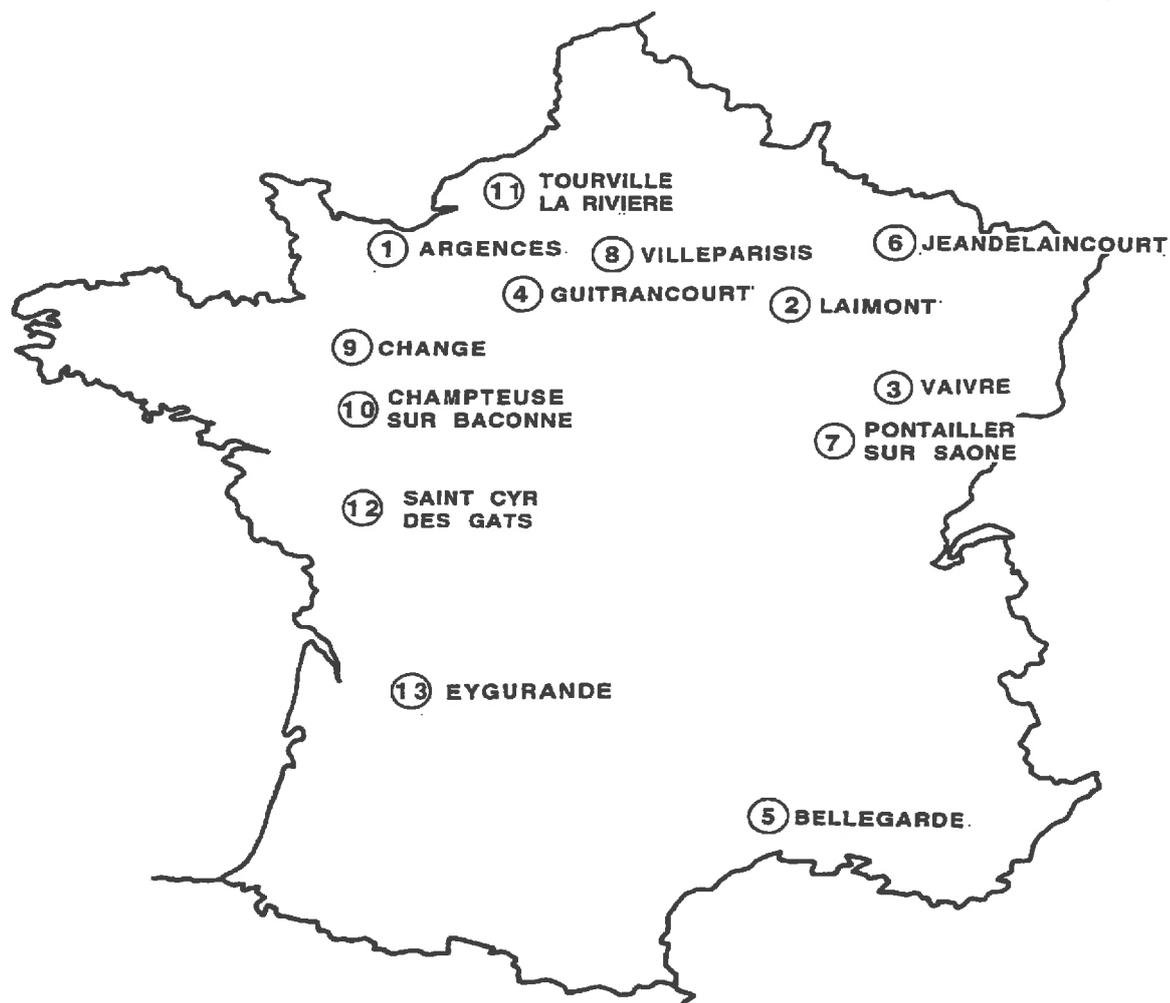


Figure 2. 2 : Localisation des Centres français d'Enfouissement Techniques de Classe 1 (d'après ADEME)

Légende : liste des Centres d'Enfouissement Technique de classe I (d'après ADEME)

n° sur la carte	Nom du Centre	Département
1	Argences	Calvados
2	Laimont	Meuse
3	Vaivre	Haute-Saône
4	Guitrancourt	Yvelines
5	Bellegarde	Gard
6	Jeandelaincourt	Meurthe-et-Moselle
7	Pontailier-sur-Saône	Côte-d'Or
8	Villeparisis	Seine-et-Marne
9	Change	Mayenne
10	Champteuse-sur-baconne	Maine-et-Loire
11	Tourville-la-rivière	Seine-Maritime
12	Saint-Cyr-des-Gats	Vendée
13	Eygurande (en projet)	Dordogne

## 2.2. Installations nucléaires de base

La législation concernant les centres de stockage de déchets radioactifs relève de celle des installations nucléaires de base dont le décret fondateur est le *décret n°63-1228 du 11/12/1963 relatif aux installations nucléaires*. Dans l'article 2 il précise : « les installations nucléaires de base sont : ..., les installations destinées au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de substances radioactives, y compris les déchets, notamment celles qui sont destinées à l'irradiation. » Il ajoute cependant : « les installations désignées ci-dessus sont des installations nucléaires de base lorsque la quantité ou l'activité totale des substances radioactives pouvant y être détenues est supérieure au minimum fixé... »

Ce minimum dépend du mode de stockage, d'après le décret du 11/12/1963. Selon que ce stockage est sous forme de sources non scellées ou scellées, les seuils minimaux sont indiqués ci-dessous.

- sous forme de sources non scellées :

- 37 MBq pour les radioéléments du groupe I
- 370 MBq pour les radioéléments du groupe II
- 3700 MBq pour les radioéléments du groupe III

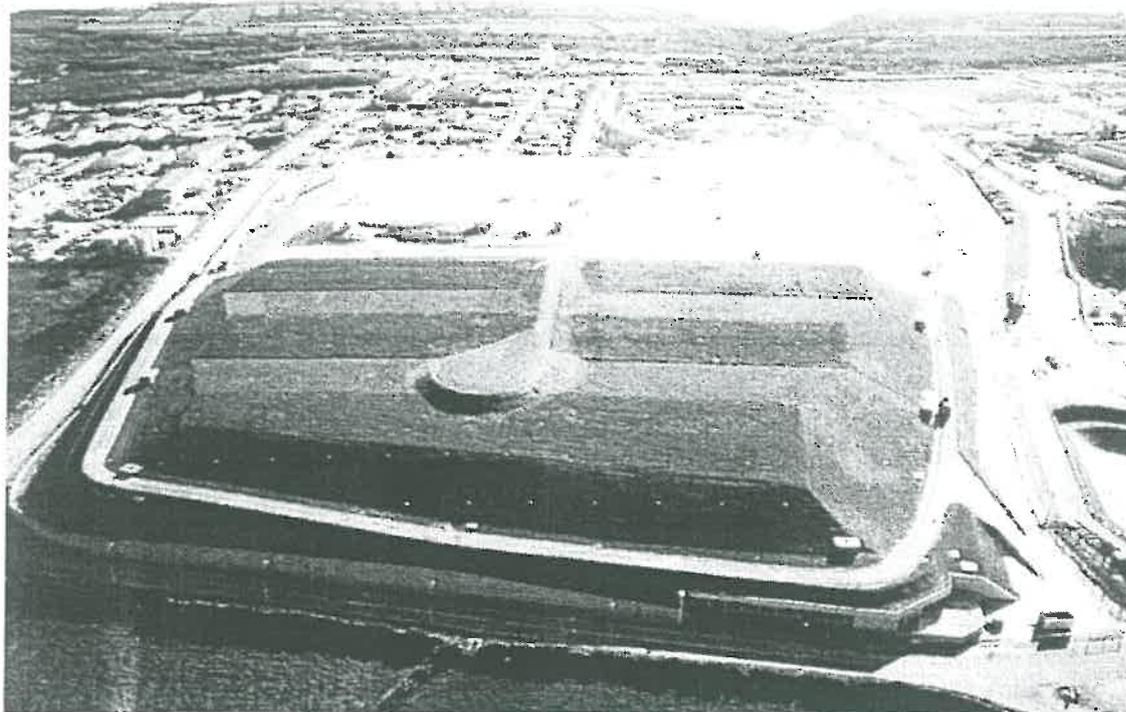
- sous forme de sources scellées :

- 370 MBq pour les radioéléments du groupe I
- 3700 MBq pour les radioéléments du groupe II
- 37000 MBq pour les radioéléments du groupe III

Il faut noter que la législation est devenue plus stricte : ainsi pour les substances radioactives solides naturelles le seuil d'activité massique de 370 MBq.kg<sup>-1</sup> défini en 1966 dans le décret n°66-450 est passé en 1988 à 500 kBq.kg<sup>-1</sup>.

Toutefois la procédure des installations nucléaires de base n'est pas applicable aux installations de stockage de résidus de traitement de minerai d'uranium puisque le seuil d'activité massique de 500 kBq.kg<sup>-1</sup> prévu par le *décret du 18/04/1988* modifiant sur ce point le *décret du 20/06/1966* pour les substances radioactives solides naturelles n'est pas atteint. Dans ce cas l'installation de stockage au sens strict est non classée. Mais si le produit a subi un traitement chimique, il peut appartenir au sens du règlement général des industries extractives à la catégories des produits à gérer pour la protection de l'environnement.

Nous avons en France actuellement 2 sites de stockage de déchets nucléaires à vie courte de faible ou moyenne activité. Le Centre Manche dont la couverture enherbée est présentée sur la figure 2.3, proche de Cherbourg, a cessé d'être exploité en 1994 et il contient 535 000 m<sup>3</sup> de déchets. Il avait été ouvert en 1969. Le Centre de l'Aube, à la limite des départements de l'Aube et de la Haute-Marne, a ouvert en 1992 et a une capacité d'environ 1 000 000 m<sup>3</sup>.



**Figure 2. 3 : Photographie du Centre Manche (cliché ANDRA)**

### **2.3. Bilan et évolution de la législation**

En conclusion, nous pouvons définir la catégorie du centre de stockage des matériaux en fonction de l'activité et de la toxicité de ces derniers (cf. tableau 2.1).

**Tableau 2. 1 : Tableau de synthèse depuis le décret du 18/04/1988**

<b>activité massique des matériaux en kiloBecquerel par kilogramme</b>	<b>catégorie des matériaux</b>	<b>catégorie du centre de stockage des matériaux</b>
inférieure à 100	déchet non toxique	installation non classée
inférieure à 100	déchet toxique	installation classée
inférieure à 500	résidu minier	installation non classée
supérieure à 100	déchet	installation nucléaire de base
supérieure à 500	résidu minier	installation nucléaire de base

Le gouvernement français, suivant les conclusions du rapport Desgraupes du 25/07/1991 sur la gestion des matières radioactives a décidé de clarifier le statut juridique du stockage des déchets faiblement radioactifs (conseil des Ministres du 22/01/1992). A ce jour il n'y a pas eu, à notre connaissance, de remise en question de la législation présentée.

### **3. Dispositifs existants ou prévus**

Il faut noter que pour les Centres d'Enfouissement Technique de classe I la législation impose partiellement les dispositifs à mettre en oeuvre au niveau de la couverture, alors que dans les autres cas la législation impose des objectifs à atteindre. Une synthèse des différents rôles de la couverture d'un stockage a été éditée par le BRGM en 1992, elle présente, du haut vers le bas, les systèmes utilisés dans les couvertures.

### **3.1. Niveau superficiel enherbé ou planté**

Ce niveau est utile à l'intégration paysagère mais aussi à la lutte anti-érosive. Les espèces végétales sont choisies en fonction des impératifs climatiques, mais aussi en fonction de leur système racinaire qui ne doit pas être trop développé en profondeur.

### **3.2. Barrière biologique**

Elle peut consister en une couche de galets ou de matériaux concassés en gros éléments, servant d'écran biologique sous le sol. Elle est placée en tête de couverture et est capable d'empêcher toute intrusion animale et végétale susceptible de dégrader la couche imperméable. Cette couche doit être relativement épaisse (environ 1 m) pour avoir de bonnes performances. Le choix des espèces végétales plantées sur la couverture est également déterminant. Toutefois l'entretien à long terme de la strate végétale est rarement garanti.

### **3.3. Système de drainage**

Le système de drainage latéral consiste en une couche poreuse de faible inclinaison, dont le rôle est de faciliter et de favoriser le drainage des eaux infiltrées à travers le sol. Le choix d'une couche de sable associée à des drains est très performant à court terme. Il faut par contre être très vigilant lors de la mise en place (fragilité des drains) et surtout s'assurer de la pérennité du système. En effet le colmatage des drains mais aussi des espaces intergranulaires est très fréquent.

### **3.4. Système d'imperméabilisation**

Le système d'imperméabilisation est le plus souvent constitué par une barrière à très faible perméabilité dont les matériaux de base peuvent être naturels ou synthétiques. Le plus souvent ce tapis d'étanchéité est constitué de sol argileux compacté, de sol et bentonite compacté et/ou d'une géomembrane.

Pour obtenir une très faible perméabilité à partir de ces matériaux, il faut que la mise en place soit parfaite : humidité des argiles, mottes de petites dimensions, énergie de compactage adaptée. Pour les géomembranes, il faut éviter les perforations ou déchirures, les défauts de soudure aux joints. Toutefois la pérennité de ces dernières est parfois difficile à estimer.

### **3.5. Système de drainage des gaz**

Ce système n'est a priori nécessaire que dans le cas de production par les déchets de biogaz en association avec l'activité bactérienne. Or la législation actuelle ne préconise que le stockage des déchets ultimes stables.

Le système de drainage des gaz est constitué d'une couche de sable poreuse et perméable, à la base du système d'imperméabilisation. Cette couche est ensuite raccordée à la surface par des cheminées d'évacuation pour dispersion ou traitement des événements.

### **3.6. Quelques exemples**

Sur le plan spatial la conception des couvertures de stockage s'organise le plus souvent en petits bassins versants afin de limiter les longues pentes et donc l'érosion (cf. chapitre 3). Cette disposition est également favorable à la gestion du stockage en petites unités. Nous présentons, aux figures 2.4, 2.5 et tableau 2.2, 3 exemples de couverture.

Tableau 2. 2 : Couvertures de stockage existantes ou en projet

Rôle \ Centres	C.S. Manche (ANDRA)	C.S. de l'Aube projet (ANDRA)	C.E.T. minimum légal
couche végétalisable	terre végétale 0,2 m pente 6 à 14 %	terre végétale 1 m pente 8 %	terre arable 0,3 m pente au moins 5 %
barrière biologique	schistes concassés 1,2 m	calcaire concassé 0,5 m	
couche drainante	sable 0,3 m + drains	sable 0,3 m + drains	niveau de perméabilité supérieure à $1.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ + drains
couche étanche	membrane bitumineuse ~ 5 mm	argile 1,5 m	géomembrane + couche de matériaux de 1 m d'épaisseur perméabilité < ou = à $1.10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$
couche drainante	sable 0,2 m + drains	sable 0,2 m + drains	niveau drainant + dispositif de mise a l'air des événements
épaisseur de la couverture	1,9 m	3,5 m	1,5 m environ
couche de forme	tout venant 2,1 à 8,1 m	tout venant 0,3 à 2,3 m	selon le site
épaisseur totale	4 à 10,5 m	3,8 à 5,8 m	selon le site

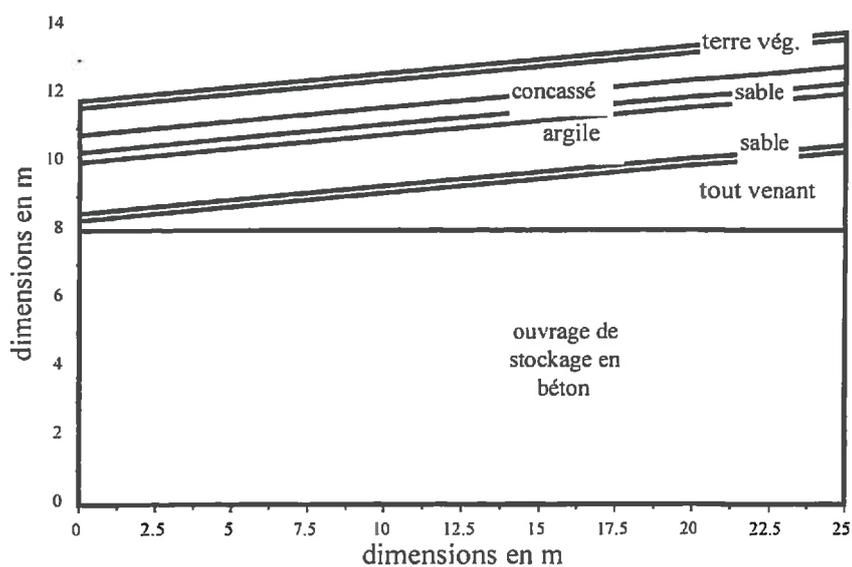
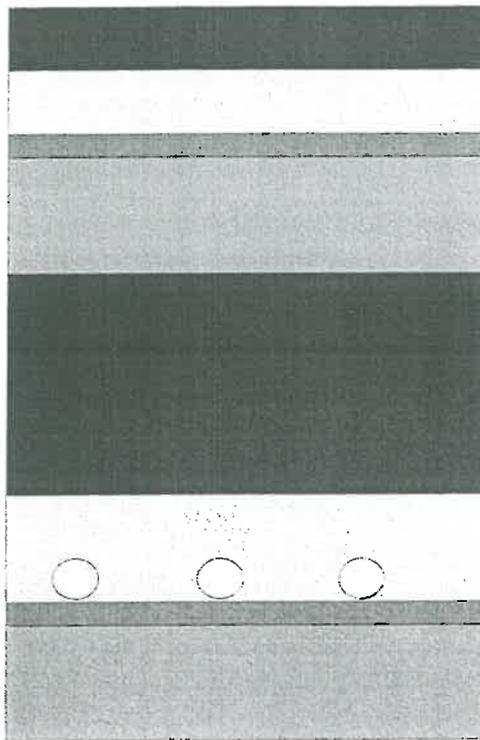


Figure 2. 4 : Projet de couverture du Centre de l'Aube (d'après ANDRA, 1993)



terre végétale (0,3 m)  
couche drainante  
géomembrane  
couche argileuse (1 m)

déchets ultimes stabilisés

filtre

couche drainante (0,5 m)  
drains (diam. 0,2 m)  
géomembrane

formation géologique (5 m)  
( $K < \text{ou} = 1.10^{-9} \text{ m/s}$ )

**Figure 2. 5 : Concept français du stockage superficiel de déchets ultimes dangereux (d'après Begassat, 1996)**

## Chapitre 3 - Prévision de l'érosion

---

La prévision de l'érosion est complexe. En effet ce phénomène dépend de 3 familles de paramètres : climatiques (l'averse par exemple), pédologiques (les caractéristiques de la couche superficielle du sol), et géométriques (les dimensions et la pente des bassins versants). La composante climatique du problème sera étudiée à l'échelle de la France dans la première partie de ce chapitre. Dans la deuxième partie, nous verrons comment extrapoler les valeurs des précipitations en un site donné afin d'obtenir les caractéristiques d'un événement climatique extrême. Précisons que les méthodes développées seront également appliquées à l'étude d'autres phénomènes climatiques comme le gel et la sécheresse dans les chapitres 4 et 5 dans lesquels elles ne seront plus détaillées. La troisième partie présente l'équation de perte en terre. Enfin la quatrième partie est consacrée à un calcul complet de prévision d'érosion (aspects climatiques, pédologiques et géométriques) sur un site de stockage de résidus miniers.

### 1. Erosivité d'une averse

#### 1.1. Définition

L'indice d'érosivité des précipitations annuelles  $R$  a été défini par Wischmeier (1978). Cet indice tient compte des averses très agressives et assez rares ("averses de pointe") mais inclut aussi l'effet cumulatif des nombreuses averses modérées. Cet indice s'obtient par cumul des indices  $EI$  d'érosivité de chaque averse d'une année. Ensuite on calcule la valeur moyenne de ce cumul annuel sur une longue série d'années que représente  $R$ .

Le paramètre  $EI$  n'est calculé que pour les averses supérieures à un seuil de 12,7 mm de précipitation ou dont l'intensité est supérieure à 6,35 mm d'eau sur 15 minutes. Ce paramètre  $EI$  (en  $t.m.ha^{-1}.cm.h^{-1}$ ) est le produit de deux termes  $E$  et  $I_{30}$ .

$E$  (en  $t.m.ha^{-1}$ ) est obtenu à partir du hyétogramme de l'averse en cumulant les valeurs de  $e$  calculées pour des intervalles de temps successifs par la formule :

$$e = [2,1 + 0,89 \cdot \log_{10}(I)] \cdot h$$

avec :  $h$  (en cm) hauteur d'eau pendant l'intervalle de temps considéré ;

$I$  (en  $cm.h^{-1}$ ) intensité des précipitations pendant l'intervalle de temps considéré.

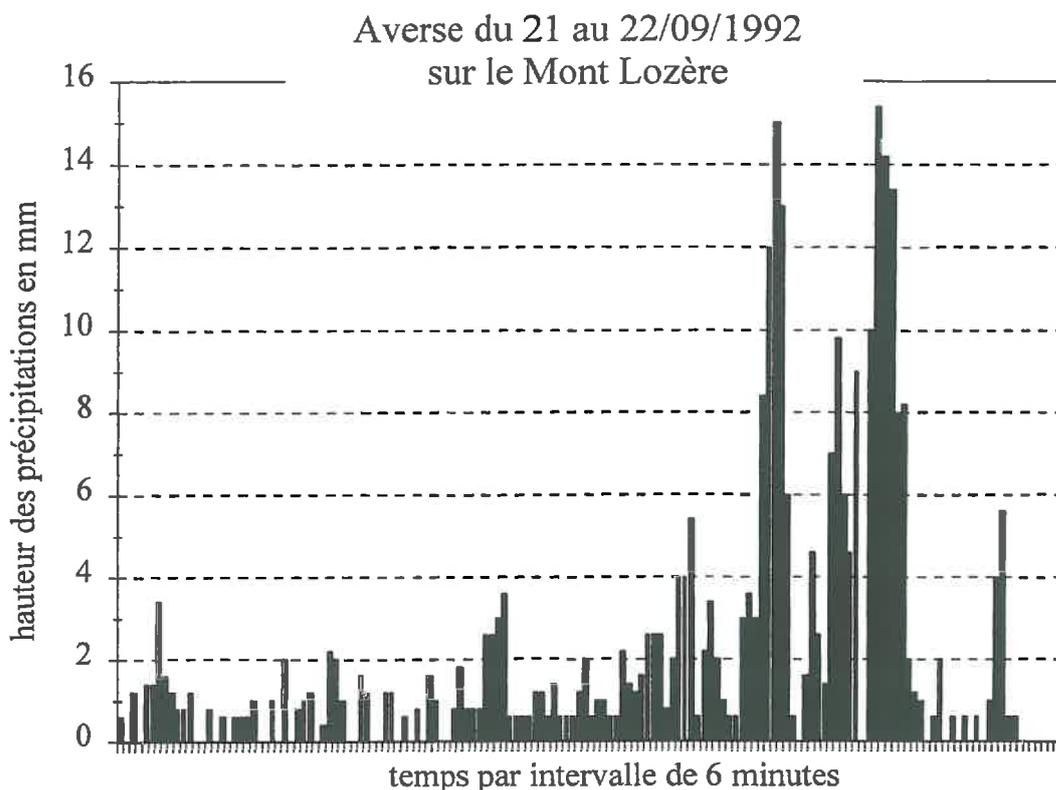
$I_{30}$  (en  $cm.h^{-1}$ ) est l'intensité maximale sur 30 minutes au cours de cette averse.

Les unités utilisées sont quelque peu incohérentes. On devrait modifier l'équation en utilisant comme unité des Joules et en homogénéisant les unités de longueur et de surface. Mais afin de pouvoir comparer les résultats avec les données bibliographiques nous respecterons les usages des auteurs cités.

#### 1.2. Calcul

Nous avons calculé ainsi le paramètre  $EI$  pour l'averse du 21 au 22/09/1992 sur le Mont Lozère (dépt. 48, entre les villes de le Bleynard et le Pont-de-Montvert). Cette averse a

commencé à 18 h le 21/09/1992 et s'est achevée à 9 h le 22/09/1992. Pendant ce laps de temps, il est tombé 312 mm d'eau (cf. figure 3.1). Une telle averse particulièrement violente a une érosivité très importante qui est largement supérieure à l'érosivité annuelle moyenne au Mont-Lozère.



**Figure 3. 1 : Hyetogramme de l'averse**

Chaque barre de l'histogramme représente la hauteur des précipitations en mm tombées pendant un intervalle de 6 minutes.

On calcule pour chaque intervalle de 6 minutes (voir le détail des calculs en annexe n°1) :

$h$ , la hauteur des précipitations en cm ;

$I$ , l'intensité des précipitations en  $\text{cm.h}^{-1}$  ;

$$e = [2,1 + 0,89 \cdot \log_{10}(I)] \cdot h$$

On somme ensuite tous les  $e$  pour calculer  $E$ .

$$E = 84,6 \text{ t.m.ha}^{-1}$$

D'autre part on a :

$$I_{30} = 13,84 \text{ en cm.h}^{-1}$$

En effet il est tombé, entre 5h54 et 6h24, 6,92 cm d'eau soit  $I_{30} = 6,92 \times 2$ .

$$\text{Enfin } EI = E \times I_{30} = 84,6 \times 13,84 = 1163 \text{ t.m.ha}^{-1} \cdot \text{cm.h}^{-1}$$

En faisant de même pour toutes les averses de l'année 1992 et en sommant les paramètres  $EI$  de chaque averse, on trouverait l'indice d'érosivité de l'année 1992 au Mont-Lozère. On notera

sur la carte de la figure 3.2 que la moyenne inter-annuelle de l'érosivité des averses au Mont-Lozère est supérieure à  $200 \text{ t.m.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$ .

De même pour la région parisienne  $R = 50$ , les autres valeurs françaises sont données par Pihan sur sa carte d'isovaleur, figure 3.2.

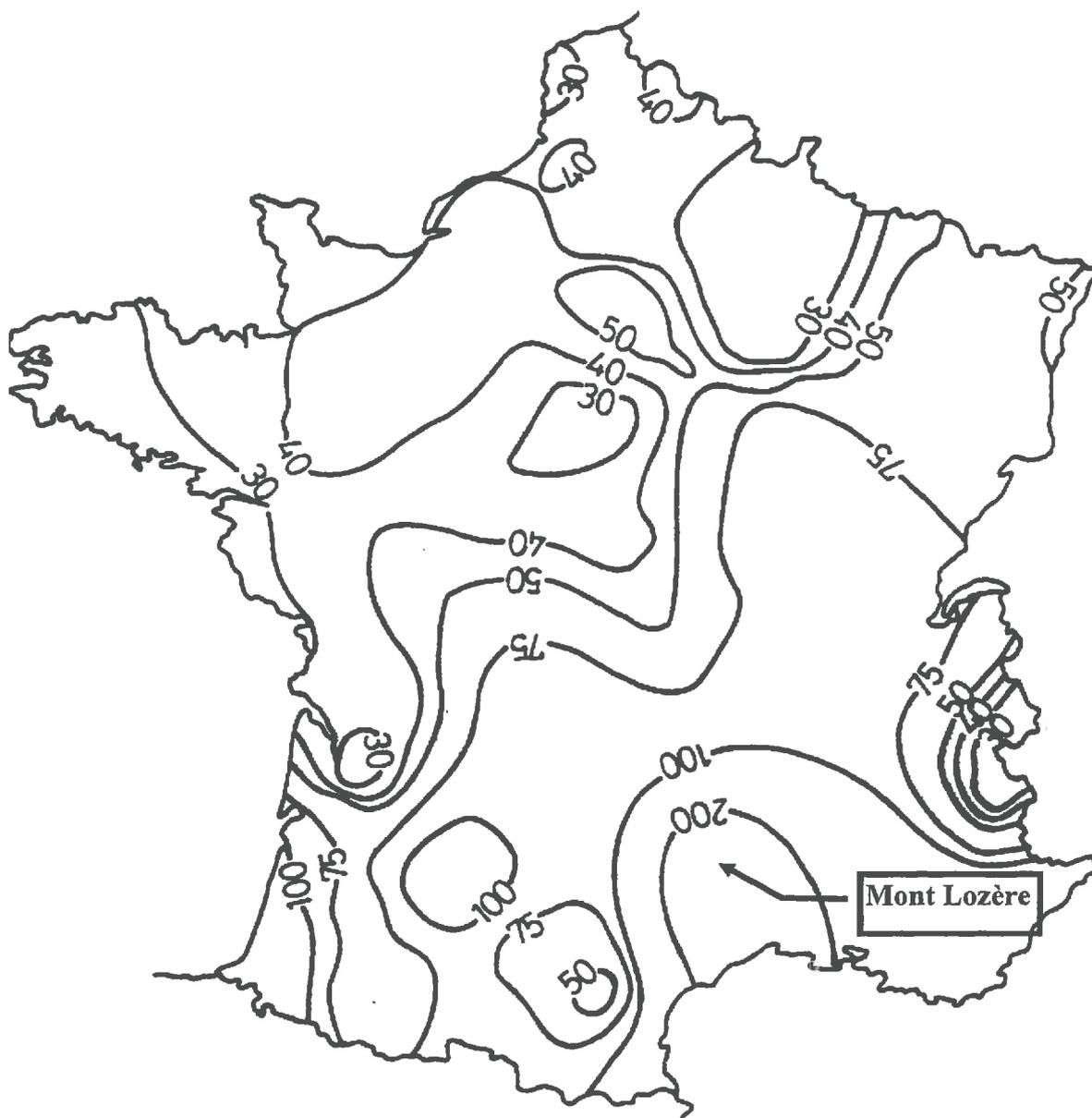


Figure 3. 2 : Erosivité des pluies en France, Répartition de l'indice R de Wisheier (d'après Pihan, 1978)

## 2. Erosivité des averses prévisibles

Afin d'estimer l'érosivité d'averses plus importantes que celles récemment tombées dans une localité donnée, on peut soit se reporter à des mesures météorologiques plus anciennes, soit étudier les averses de régions au climat plus sévère.

## 2.1. Données historiques ou mondiales

Sur le plan historique, la quantification des événements climatiques est assez récente. En France, en 1688, Philippe de La Hire place un premier pluviomètre sur la plate-forme de l'Observatoire de Paris à la demande de l'Académie des Sciences, Colbert voulant connaître la quantité d'eau que les pluies pourraient fournir pour alimenter les réservoirs du parc de Versailles. Les observations se sont poursuivies jusqu'en 1962 avec quelques interruptions. En 1817 un autre pluviomètre a été établi sur le sol de la cour de l'Observatoire et les mesures continuent encore aujourd'hui. Au 18<sup>ème</sup> siècle d'autres pluviomètres ont été installés à Bordeaux (1714), Marseille (1748), Dijon (1763), Lyon (1765), Montpellier (1765), La Rochelle (1777), Viviers en Ardèche (1778), etc. Les plus anciennes stations météorologiques françaises qui sont souvent loin des sites présentés dans le chapitre 2 ont donc environ 100 à 150 années de recueil de données. Pour des stations plus proches des sites 30 à 50 ans de données seront disponibles.

Sur le plan mondial, le Weather Bureau des Etats-Unis a établi, en coordonnées log-log, la courbe reliant la hauteur des précipitations exceptionnelles à la durée de celles-ci pour les averses les plus intenses et de durée comprise entre 1 minute et 12 mois enregistrées à travers le Monde (cf. figure 3.3). Les points expérimentaux se regroupent assez bien autour d'une droite qui peut être considérée comme l'enveloppe de toutes les pluies exceptionnelles. Ces informations peuvent constituer une référence pour la critique d'extrapolations insuffisamment justifiées.

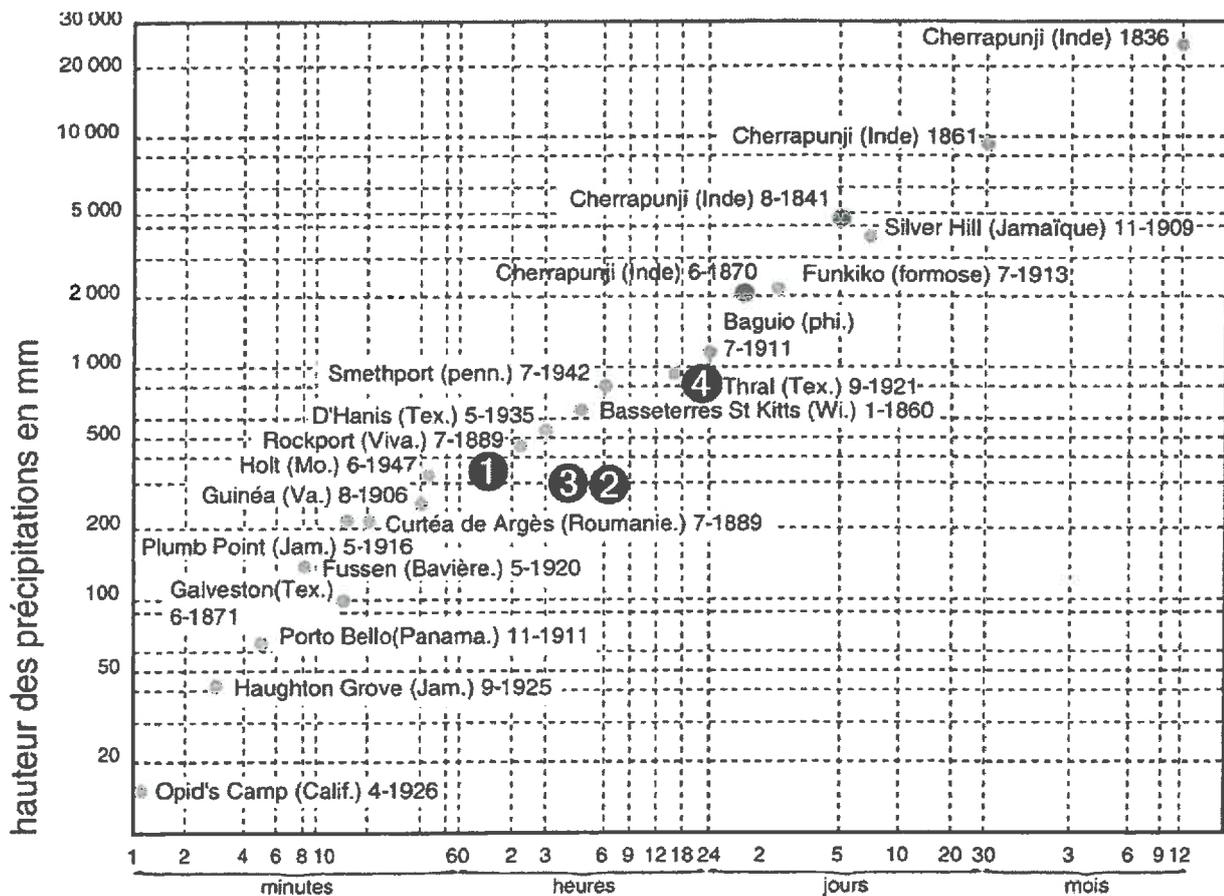


Figure 3. 3 : Les hauteurs de pluie record dans le monde pour différentes durées (d'après Woolard, 1941)

On a intégré à cette figure quelques valeurs françaises qui sont réunies dans le tableau 3.1.

**Tableau 3. 1 : Averses françaises extrêmes**

N°	Lieu	Date	Hauteur des précipitations	Durée de l'averse
1	Molitg-les-bains	20/05/1868	313 mm	1 h 35 min
2	Catastrophe de "Nîmes" (estimation)	03/10/1988	250 mm	6 h
3	Catastrophe de "Vaison la Romaine" Etrechaux (estimation)	22/09/1992	300 mm	4 h
4	Joyeuse (Ardèche)	09/10/1827	792 mm	22 h

L'indice d'érosivité dépend de la hauteur des précipitations et de l'intensité de celles-ci. Nous rappellerons donc quelques valeurs de référence.

### 2.1.1. Précipitations journalières

Le relevé des précipitations se fait à heure fixe, tous les jours ou toutes les 6 heures. De ce fait on estime les valeurs des précipitations sur 24 h par la valeur des précipitations entre 2 dates fixes séparées par 24 h. On sous-estime donc souvent la valeur des précipitations sur 24 h. Le tableau 3.2 donne quelques exemples de précipitations journalières extrêmes.

**Tableau 3. 2 : Précipitations journalières extrêmes**

stations	date	hauteur d'eau en mm	durée de l'averse
Joyeuse (Ardèche)	09/10/1827	792 mm	22 heures
Hendaye	08/10/1947	645 mm	< 24 heures
Perpignan	25/10/1915	435 mm	< 24 heures
Montpellier	08/09/1938	318 mm	< 24 heures

En France c'est au sud du 45° parallèle qu'on observe les plus fortes précipitations. Au nord, les hauteurs d'eau supérieures à 100 mm en 24 h sont très rares. Depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle de tels records ont été enregistrés 4 fois seulement en région parisienne, avec un maximum de 140 mm à Montreuil le 04/07/1926 en 3 h 30.

### 2.1.2. Intensité des précipitations

Dans la moitié nord de la France une précipitation d'intensité dépassant 1 millimètre par minute est déjà exceptionnelle ( $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 1 \text{ litre} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ). D'après les estimations présentées ci-dessus des valeurs nettement supérieures à  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  sont prévisibles. Des observations l'ont confirmé. Ainsi, dans la région parisienne, on a recueilli 4 mm de pluie en 1 minute d'intervalle au plus fort d'une averse.

Dans le midi, on a observé des intensités plus fortes sur des averses plus longues (cf. tableau 3.3).

**Tableau 3. 3 : Intensité des précipitations françaises remarquables (d'après Jacq, 1994)**

Lieux	Dates	Hauteur et durée des précipitations	Intensité des précipitations
Moligt-les-bains(66)	20/05/1968	313 mm en 1 h 35 min	3,29 mm.min <sup>-1</sup>
Mas Nerel (66)	13/10/1986	382 mm dont 313 mm en 3 h 160 mm en 1 h 90 mm en 30 min	1,73 mm.min <sup>-1</sup> 2,66 mm.min <sup>-1</sup> 3 mm.min <sup>-1</sup>
Mées (04)	01/10/1990	65 mm en 20 min	3,25 mm.min <sup>-1</sup>
Chateau-neuf-du-pape (84)	30/07/1991	265 mm dont 130 mm en 1 h 81 mm en 30 min 26 mm en 6 min	2,16 mm.min <sup>-1</sup> 2,7 mm.min <sup>-1</sup> 4,33 mm.min <sup>-1</sup>
Castelnau le lez (34)	20/09/1993	112 mm en 50 min	2,24 mm.min <sup>-1</sup>

## 2.2. Ajustement statistique et extrapolation

A partir des données quotidiennes ou des valeurs records annuelles, il s'agit d'établir les valeurs de périodes de retour beaucoup plus grandes comme l'averse centennale ou millennale.

Les distributions statistiques utilisées sont la loi log-normale, la loi de Gumbel et la loi de Fréchet. Les lois de Gumbel et de Fréchet ont été choisies car elles font partie des lois de distribution de valeurs extrêmes. L'intervalle de confiance des extrapolations est également calculé. Pour diminuer l'aléa statistique, de longues séries de données permettent la validation de l'ajustement. Enfin nous vérifions que les valeurs estimées sont assez proches de la réalité historique régionale.

Loi log-normale : une fonction linéaire du logarithme de la variable suit la loi normale.

$$y = a \log x + b \quad \text{et sa densité de probabilité :}$$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y - \bar{y}}{\sigma} \right)^2}$$

Loi de Gumbel : (fonction de répartition)

$$F(x) = e^{-e\left(-\frac{x - \alpha}{\beta}\right)}$$

Loi de Fréchet : (fonction de répartition)

$$F(x) = e^{-e\left(-\frac{\log x - \alpha}{\beta}\right)}$$

Lorsque l'on fait des calculs statistiques sur de longues séries de données, il faut s'assurer que ces séries sont homogènes et que la quantité de données est suffisante. Enfin il faut parfois se méfier des données très anciennes dont les unités ne sont pas toujours spécifiées. Ceci fait l'objet des paragraphes 2.2.1, 2.2.2 et 2.2.3.

### 2.2.1. Problèmes des séries de données hétérogènes

Pour s'assurer qu'une série de données est homogène on utilise deux méthodes :

- la méthode des doubles cumuls ;
- le test des concordances.

La première fait intervenir le caractère spatial (on compare la station testée aux stations voisines) ; la deuxième teste l'homogénéité statistique de la série des données d'une station indépendamment des autres. L'hétérogénéité d'une série peut être due à un déplacement de la station, à des erreurs d'observation, à des modifications des conditions de relevé ou à un changement climatique exceptionnel d'une année.

#### *2.2.1.1. La méthode des doubles cumuls*

Cette méthode dite aussi : "méthode de Brunet Moret" est décrite dans les cahiers de l'ORSTOM, série hydrologie, . Dans un secteur géographique donné, chaque poste est comparé à une station homogène de référence, représentative de la pluviométrie du secteur. On dresse le tableau suivant :

Indice i	Année t	module annuel de la station X	module annuel de la station Y	C <sub>Xt</sub>	C <sub>Yt</sub>	R <sub>i</sub>	P
1	1950	660 mm	700 mm	660	700	0.989	-0.008
2	1951	850 mm	880 mm	1510	1580	0.989	0.006
3	1952	820 mm	870 mm	2380	2450	0.989	0.061
4	1953	680 mm	710 mm	3090	3160	1.005	0.106

avec :

$\bar{X}$  moyenne des modules annuels de la station X sur la période totale

$\bar{Y}$  moyenne des modules annuels de la station Y sur la période totale

$$C_{Xt} = \sum_{i=1}^t X_i \quad \text{et} \quad C_{Yt} = \sum_{i=1}^t Y_i$$

$$R_i = \frac{X_i}{Y_i} \cdot \frac{\bar{Y}}{\bar{X}}$$

$$P = \frac{C_{Xt}}{\bar{X}} - \frac{C_{Yt}}{\bar{Y}}$$

Si  $R_i$  est trop différent de 1, la valeur est douteuse ; la série est considérée comme non homogène si la valeur absolue de  $P$  dépasse 0,6.

#### *2.2.1.2. Le test des concordances*

Le test porte sur le classement des cumuls mensuels de q années. On classe par ordre croissant les valeurs de janvier, de février, ... et on affecte le rang dans l'ordre de classement à la donnée. Pour chaque année on fait la somme des rangs des 12 mois appelée  $X_j$  ( $j$  est l'indice de l'année considérée).

On calcule S et  $S_0$  :

$$s = \sum_{j=1}^q \left[ X_j - 12 \cdot \frac{q+1}{2} \right]^2 \quad \text{et} \quad S_0 = 12 \cdot (q^3 - q)$$

- pour  $j \leq 8$  on calcule  $F = \frac{12-1}{S_0-S} \cdot S$  et  $F$  doit suivre une loi de Fisher Snédécour.

- pour  $j \geq 9$  on calcule  $W = S/S_0$  et  $W$  doit suivre une loi du chi-deux à  $q-1$  degré de liberté pour que la série soit homogène.

On teste l'hypothèse d'homogénéité de la série au seuil de 5% et 1%. Pour chaque poste, on teste les 2 premières années, puis les 3, ... ; dans l'ordre chronologique et dans l'ordre inverse.

### 2.2.1.3. Reconstitution d'une série homogène à partir d'une série hétérogène

En cas de déplacement d'une station entre les sites a et b, il faut reconstituer une série homogène à partir de 2 séries de données.

Cet ajustement se fait par comparaison avec une station voisine (c) ayant simultanément, pendant les périodes  $P_1$  et  $P_2$  recueilli des informations homogènes. Le choix de la station de référence étant limité, l'efficacité de l'ajustement est contestable car il dépend de la corrélation entre ces deux stations.

La formule est :

$$\bar{T}' a (M) - \bar{T} b (M) = [\bar{T} a (P_1) - \bar{T} c (P_1)] - [\bar{T} b (P_2) - \bar{T} c (P_2)]$$

$\bar{T}' a (M)$  est la moyenne reconstituée pour le site a pour le mois M (M est un mois de la période  $P_2$ ).

$\bar{T} b (M)$  est la moyenne calculée pour le site b pour le mois M.

$\bar{T} a (P_1)$  est la moyenne mensuelle calculée pour le site a sur toutes les années de la période  $P_1$ .

$\bar{T} c (P_1)$  est la moyenne mensuelle calculée pour la station c sur toutes les années de la période  $P_1$ .

$\bar{T} b (P_2)$  est la moyenne mensuelle calculée pour le site b sur toutes les années de la période  $P_2$ .

$\bar{T} c (P_2)$  est la moyenne mensuelle calculée pour la station c sur toutes les années de la période  $P_2$ .

### 2.2.2. Problèmes d'insuffisance de données

Ce problème est très souvent rencontré car les prévisions à long terme nécessitent un grand nombre de données de base. La méthode utilisée pour pallier à ce problème est méthode des stations années. Elle consiste essentiellement à combiner les relevés (simultanés) de deux ou plusieurs stations pour obtenir une série unique d'observations que l'on admet équivaloir à celles qui auraient été effectuées à une seule station pendant une durée deux ou plusieurs fois plus longue.

L'analyse statistique du problème montre que la méthode des stations années repose sur l'hypothèse que les averses survenues à une station déterminée auraient pu tout aussi bien, se présenter à l'une quelconque des autres stations du même groupe, de sorte que 5 séries

individuelles de 10 ans peuvent être assimilées à une série unique de 50 ans. Il faut que deux conditions soient remplies :

- indépendance statistique des relevés (éloignement des stations) ;
- bonne homogénéité climatologique (ce sont les mêmes processus météorologiques qui génèrent les précipitations).

### 2.2.3. Problèmes liés à l'abondance des données

La diversité des appareils enregistreurs des précipitations qui étaient installés dans un nombre relativement minime de stations, la confiance limitée accordée aux enregistrements ainsi recueillis font qu'on hésite encore à normaliser les opérations de dépouillement des anciens pluviogrammes.

Même quand on a le courage et la patience de s'aventurer dans ces dépouillements longs et fastidieux qu'aucune machine statistique actuelle n'est capable de faire avec le discernement nécessaire, il est bien difficile une fois le travail achevé, de se débarrasser d'une certaine méfiance vis à vis des résultats obtenus. C'est que, dans le cas le plus général et, à supposer que le matériel de départ soit irréprochable, le responsable de telles études a posteriori ne peut en garantir l'exactitude que s'il est sûr d'avoir pris toutes les précautions indispensables. L'analyse statistique faite à partir de données obtenues dans des conditions parfois douteuses risque trop de conduire à des informations chiffrées trompeuses, donc plus nuisibles pour l'utilisateur non prévenu que des estimations subjectives mais nuancées.

### 2.2.4. Problèmes liés à la qualité des données

Les études statistiques n'ont un sens que si elles sont réalisées à partir de valeurs issues d'une population homogène, or il est rarement juste de penser qu'un événement extrême est de même nature qu'un événement quotidien. Nous avons donc choisi d'utiliser les valeurs maximales annuelles en supposant qu'elles appartenaient à une même population. On aurait également pu choisir de travailler à partir de valeurs supérieures à un seuil donné. Toutefois notre objectif était de relier les événements atmosphériques à leurs effets au sol et les « liaisons » présentées sont indépendantes de la méthode choisie pour la quantification des événements climatiques extrêmes.

## **2.3. Aléas statistiques**

Le tableau 3.4 présente les écarts observés entre le module pluviométrique moyen calculé sur une courte période et ce module calculé sur une longue période. Il en résulte les recommandations d'usage de 30 années pour calculer le module moyen annuel.

**Tableau 3. 4 : Ecart observés entre les modules pluviométriques moyens**

suivant la longueur de la période de référence utilisée pour les calculer  
et cela pour 53 stations du monde.  
(d'après Réménieras, 1965)

Nombre d'années utilisé pour le calcul du module moyen.	Ecart maximum, en %, de cette moyenne avec une moyenne calculée sur une longue période.	
	+	-
1	51	40
2	35	31
3	27	25

Nombre d'années utilisé pour le calcul du module moyen.	Ecart maximum, en %, de cette moyenne avec une moyenne calculée sur une longue période.	
5	15	15
10	8,22	8,22
20	3,24	3,24
30	2,26	2,26

Au contraire, la dispersion des valeurs extrêmes autour de la "valeur centrale" tendra généralement à augmenter avec la durée d'observation.

Pour avoir une idée de l'aléa statistique lié à une méthode de calcul, on peut estimer la valeur de l'averse millennale à partir de différentes lois statistiques et calculer ensuite les différences entre les valeurs ainsi obtenues. Les fonctions de répartition statistique utilisables dans ce cas sont :

- la distribution log-normale ;
- les distributions de Pearson ;
- la loi de Gumbel ou distribution des valeurs extrêmes ;
- la loi de Fréchet.

Pour certaines lois statistiques, on peut également calculer l'intervalle de confiance.

Pour la loi de Gumbel par exemple, il suffit de calculer l'écart type de la série d'observations et de chercher dans l'abaque de Bernier les coefficients C1 et C2 qui permettent de calculer la borne supérieure et la borne inférieure de l'intervalle de confiance (cet intervalle est dissymétrique). Ces coefficients sont fonctions de 3 paramètres : le degré de certitude recherché, le nombre d'observation de la série et la probabilité de l'événement considéré. Les abaques sont donnés à la figure 3.4.

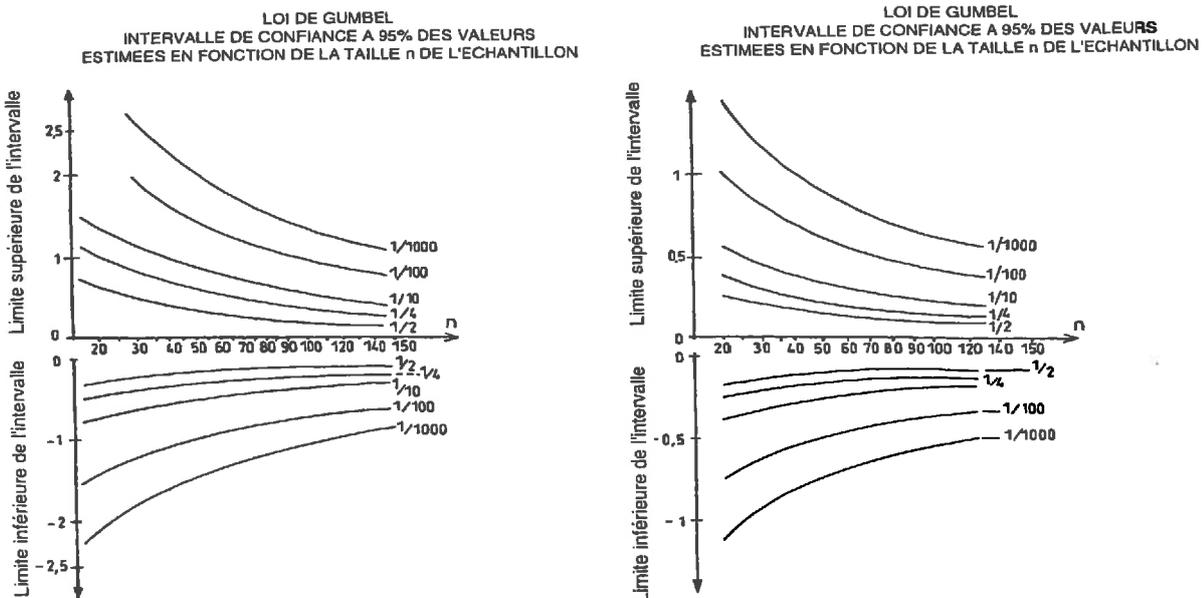


Figure 3. 4 : Abaques de Bernier pour la loi de Gumbel

n est le nombre d'observations.

1/1000 courbe à utiliser pour les averses millennales.

On lit les coefficients C1 et C2 et on calcule la borne inférieure Pinf et supérieure Psup de l'intervalle :

$$P_{inf} = P_{1000} - C1 \cdot \sigma$$

$$P_{sup} = P_{1000} + C2 \cdot \sigma$$

$\sigma$  est l'écart type de la série d'observation et  $P_{1000}$  est la précipitation millennale estimée par l'ajustement.

Ainsi on peut, par exemple, conclure : il y a 70 % de chance que la précipitation millennale soit comprise entre Pinf et Psup.

On peut aussi tester l'ajustement de la variable à la loi statistique par le test du chi-deux ou de Kolmogorov.

### 3. Calcul de la perte en terre

#### 3.1. Présentation

L'érosivité, ou agressivité érosive de la pluie, est classiquement mesurée par le facteur R de "l'équation universelle de perte en terre" (USLE) de Wischmeier et al. (cf paragraphe 1.1). Ce paramètre est utilisé pour estimer l'aptitude des pluies à produire de l'érosion de versants (incluant la formation de petites rigoles dans les lignes de semis) en intégrant sur une période donnée tous les événements susceptibles d'y contribuer. Son intérêt est donc de permettre d'apprécier le risque climatique de dégradation du sol à plus ou moins long terme.

$$E = R \cdot K \cdot (L \cdot S) \cdot (C \cdot P)$$

E : Perte en sol mesurée ou prévisible, exprimée en tonne par hectare pendant l'unité de temps choisie.

R : Indice d'érosivité des pluies pendant l'unité de temps choisie.

K : Indice d'érodabilité des sols; il dépend de la granulométrie, de la structure, de la perméabilité et de la teneur en matière organique du sol. Nous utiliserons les valeurs fournies par l'Environmental Protection Agency des USA (1982) (cf. tableau 3.5).

L.S : Facteur de pente, fonction de sa longueur : l en mètre et de sa pente en % (sinus de l'angle avec l'horizontale) :

$$L \cdot S = \left( \frac{\sqrt{3,28 \cdot l}}{100} \right) \cdot (0,76 + 0,53s + 0,076s^2)$$

C : Effet des pratiques culturales. Il y a des abaques pour les cultures typiques aux Etats-Unis, mais on donnera à titre d'exemple : C = 1 pour un sol nu ; 0,1 pour une prairie mise en pâture ; 0,01 pour une prairie non mise en pâture et 0,001 pour une forêt.

P : Effet des pratiques anti-érosives : labour selon les courbes de niveaux, culture en terrasses. En l'absence de telles pratiques, il est égal à 1 sinon on utilisera les valeurs du tableau 3.6.

Cette équation ne prend en considération que l'érosion diffuse et l'érosion en rigoles. Elle ne tient pas compte du ravinement concentré dans les talwegs. Son application n'a donc guère de sens dans les secteurs où cette dernière forme d'érosion domine. De même cette équation n'est valable que pour des pentes inférieures à 18 %.

**Tableau 3. 5 : Valeurs d'érodabilité des sols : K (tiré de BRGM, 1992)**

Sable de 0,05 à 2 mm    Silt de 0,002 à 0,05 mm    Argile <0,002 mm

	Teneur en matière organique		
	< 0,5 %	2 %	4 %
Sable	0,05	0,03	0,02
Sable fin	0,16	0,14	0,10
Sable très fin	0,42	0,36	0,28
Sable limoneux	0,12	0,10	0,08
Sable fin limoneux	0,24	0,20	0,16
Sable très fin limoneux	0,44	0,38	0,30
Limon sableux	0,27	0,24	0,19
Limon fin sableux	0,35	0,30	0,24
Limon très fin sableux	0,47	0,41	0,33
Limon	0,38	0,34	0,29
Limon silteux	0,48	0,42	0,33
Silt	0,60	0,52	0,42
Limon argileux sableux	0,27	0,25	0,21
Limon argileux	0,28	0,25	0,21
Limon argileux silteux	0,37	0,32	0,26
Argile sableuse	0,14	0,13	0,12
Argile silteuse	0,25	0,23	0,19
Argile	0,13-0,29	0,13-0,29	0,13-0,29

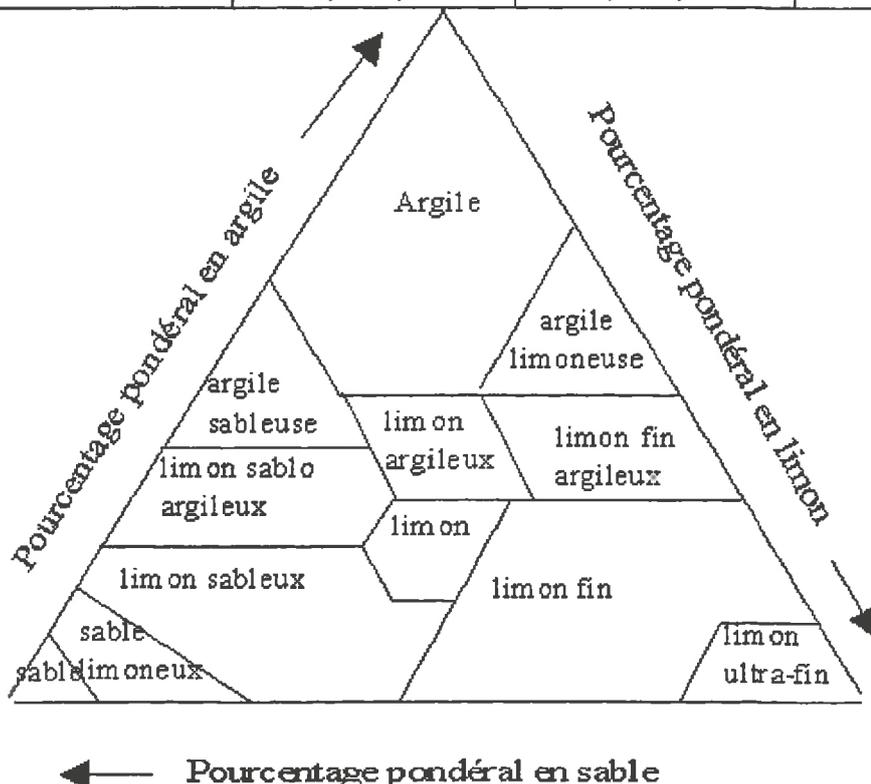


Tableau 3. 6 : Indice des pratiques anti-érosives : P (tiré de BRGM, 1992)

Pratiques	Pente en %			
	0<Pente<7	7,1<Pente<12	12,1<Pente<18	18,1<Pente<24
Sol labouré selon les courbes de niveau	0,5	0,6	0,8	0,9
Sol travaillé en sillons et crêtes selon les courbes de niveau	0,25	0,30	0,40	0,45
Présence de terrasses parallèles aux courbes de niveau n = nombre de terrasses	$0,1 \cdot n^{-1/2}$	$0,12 \cdot n^{-1/2}$	$0,16 \cdot n^{-1/2}$	$0,18 \cdot n^{-1/2}$

#### 4. Cas d'application

Nous noterons que l'exemple de calcul ci-après n'est pas le dimensionnement d'une couverture, mais qu'il est destiné à fournir des éléments nécessaires au dimensionnement.

Nous avons essayé de définir les conditions climatiques extrêmes à prendre en compte dans le cadre de l'étude de la pérennité vis-à-vis de l'érosion des produits de recouvrement d'un site minier en climat méditerranéen. La carte de la figure 3.5 situe les stations météorologiques dont les données ont été utilisées.

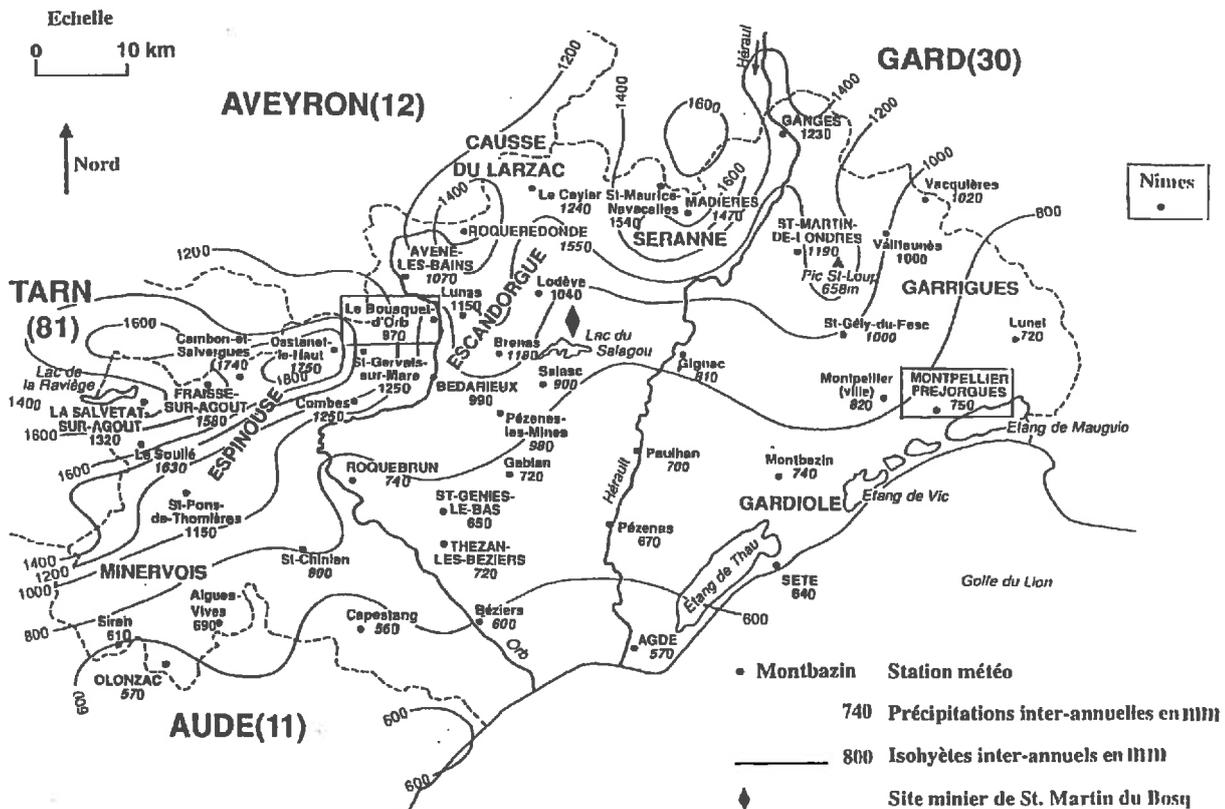


Figure 3. 5 : Carte des stations météorologiques du département de l'Hérault (34) et des stations voisines

## 4.1. Précipitations et érosivité des averses

L'étude des précipitations a été divisée en deux parties. Dans la première partie, nous envisagerons les averses brèves : de quelques minutes à quelques heures. Pour ces averses, nous étudierons les hauteurs des précipitations et les intensités selon des périodes de retour comprises entre 2 et 100 ans. La seconde partie est consacrée aux événements pluvieux plus longs (de 1 à 2 jours). Nous rappellerons les événements ayant déjà eu lieu et nous essayerons de prévoir par des méthodes statistiques ceux qui risquent de se produire avec des périodes de retour de 2 à 1000 ans.

Cette étude fait suite à la "Note relative à la climatologie et à la morphogenèse en climat méditerranéen" réalisée par J.L. Nolf (COGEMA Hérault). Nous utilisons, dans les deux parties, des valeurs numériques fournies par Météo-France à la COGEMA. Par contre, les données concernant la station « le Bousquet d'Orb » ont été commandées spécialement par le CGI. L'exploitation de l'ensemble de ces valeurs complète l'étude déjà réalisée par J.L. Nolf.

### 4.1.1. Averses et intensité de précipitation

#### *4.1.1.1. Averses*

L'étude des averses et des intensités de précipitation nécessite l'utilisation d'enregistrements précis des hauteurs de précipitations au cours des averses. Ces appareils (pluviographes) ne sont présents que dans quelques stations météorologiques. De plus si l'on souhaite utiliser ces enregistrements sur de longues périodes de temps de 30 à 50 ans, le nombre des stations météorologiques possédant de telles informations est d'autant plus réduit.

La station de Montpellier Fréjorgues située à 3 m d'altitude enregistre les précipitations en continu depuis 1957. D'après la carte des isohyètes inter-annuels, cette station a une pluviométrie de 750 mm, légèrement plus faible que le site minier de St. Martin du Bosq situé à l'altitude de 250 m en moyenne dont la pluviométrie inter-annuelle est de 765 mm (calculée sur la période 1980-1994). Toutefois cette différence est minime comparée aux objectifs de calcul.

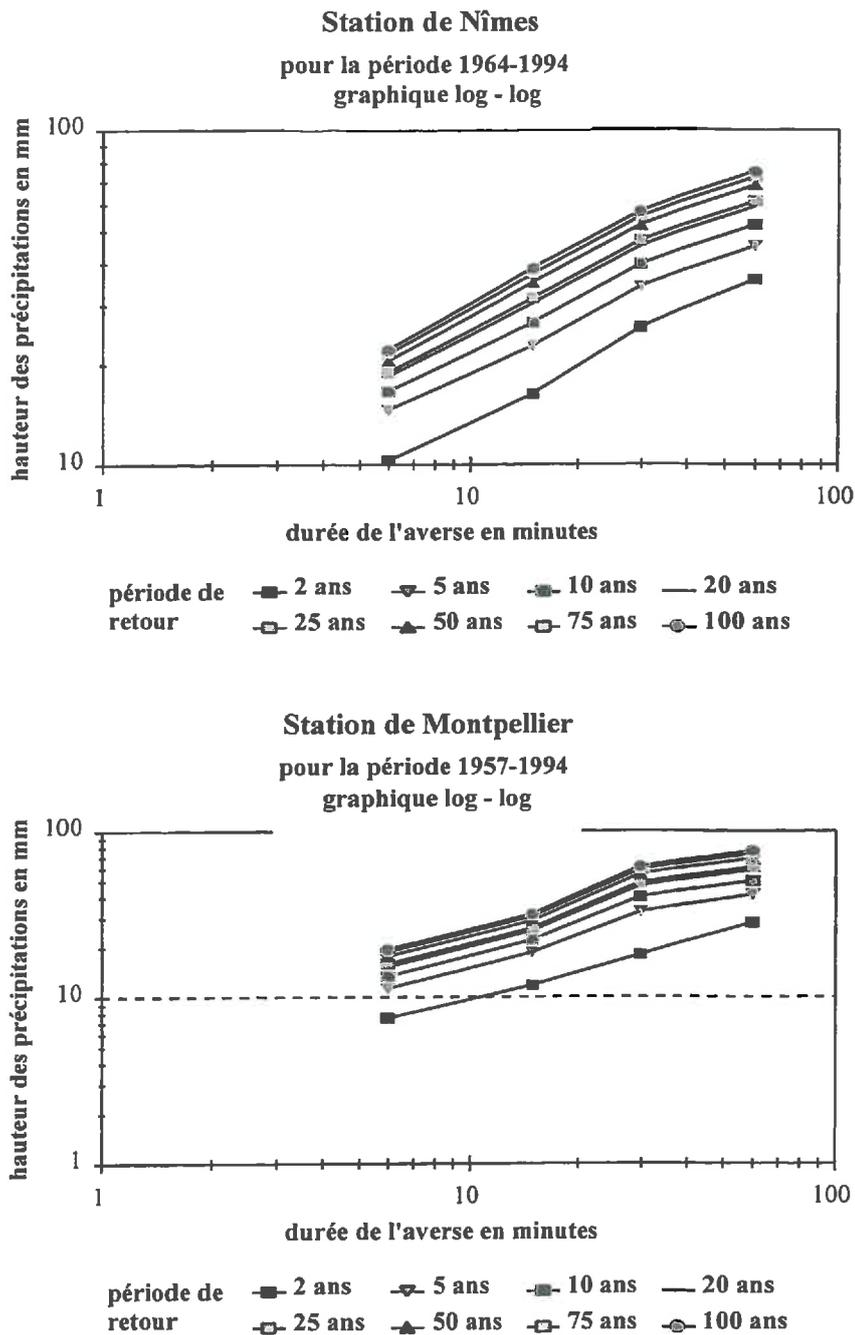
La station de Nîmes enregistre les précipitations en continu depuis 1964, son altitude est de 60 m, et sa pluviométrie inter-annuelle est de 735 mm (calculée sur la période 1946-1995).

La station de le Bousquet d'Orb enregistre les précipitations depuis 1949, son altitude est de 246 m, et sa pluviométrie inter-annuelle est de 970 mm.

Ces sites : Nîmes, Montpellier, St Martin du Bosq et le Bousquet d'Orb sont sur la bordure Méditerranéenne et subissent des averses du même type. L'étude statistique des hauteurs des précipitations, des intensités et durées des averses, est donc transposable au site minier de St Martin du Bosq. Nous notons que ces 4 sites ne sont pas à la même distance des sommets et que dans le cas de précipitations orographiques, cette transposition n'est pas complètement justifiée. Nous rappelons en outre dans cette étude les caractéristiques des averses de la ville de Paris afin de bien mettre en évidence les spécificités du climat méditerranéen.

La figure 3.6 donne les courbes hauteur de précipitation - durée de l'averse pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier. Ces courbes montrent, par exemple, qu'à Montpellier pendant une averse de 40 minutes ayant une période de retour de 10 ans, il tombe 44 mm d'eau.

La figure 3.7 compare les averses des stations de Nîmes, Montpellier et Paris. De façon générale les averses de Nîmes et Montpellier sont quasi-identiques. On note toutefois que les averses d'une durée supérieure à 1 heure sont plus importantes à Montpellier qu'à Nîmes.



**Figure 3. 6 : Relation hauteur de précipitation - durée de l'averse pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier**

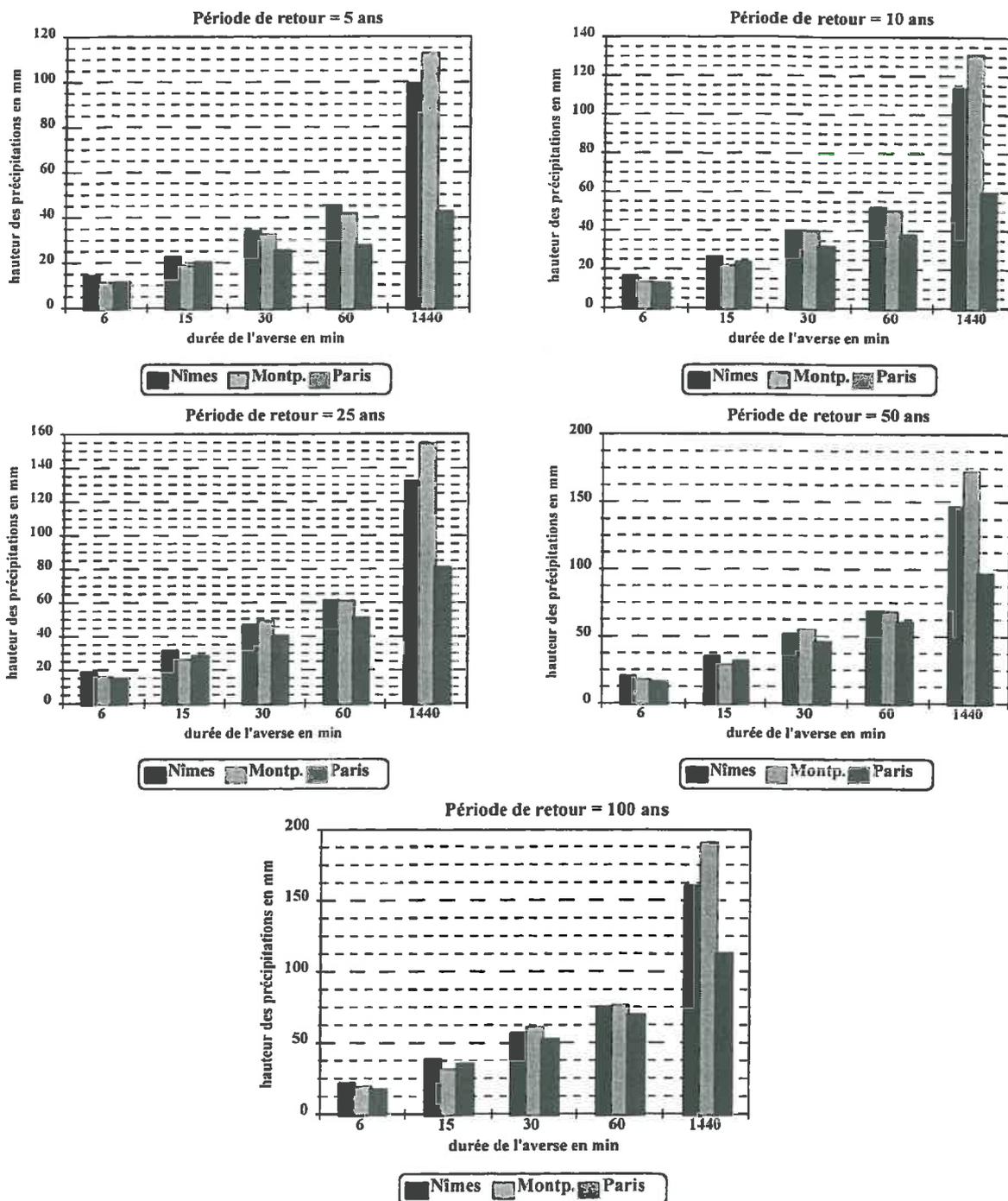


Figure 3.7 : Comparaison des hauteurs de précipitations - durées des averses pour les stations de Nîmes Montpellier et Paris pour différentes périodes de retour

#### 4.1.1.2. Intensité de précipitation

L'étude des intensités de précipitation est très intéressante, en effet le calcul de l'érosivité d'une averse dépend fortement de l'intensité des pluies. Précisons que les valeurs présentées sont des intensités moyennes au cours de l'averse et non pas des intensités maximales instantanées.

La figure 3.8 donne les courbes intensité de précipitation - durée de l'averse pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier. Ces courbes montrent, par

exemple, qu'à Montpellier pendant une averse de 40 minutes ayant une période de retour de 10 ans, l'intensité moyenne est de 1,1 mm.min<sup>-1</sup>.

La figure 3.9 compare les intensités des averses des stations de Nîmes, Montpellier et Paris. De façon générale les averses de Nîmes, Montpellier et Paris sont quasi-identiques. On note toutefois que les intensités des averses de faibles durées sont plus importantes à Nîmes qu'à Montpellier.

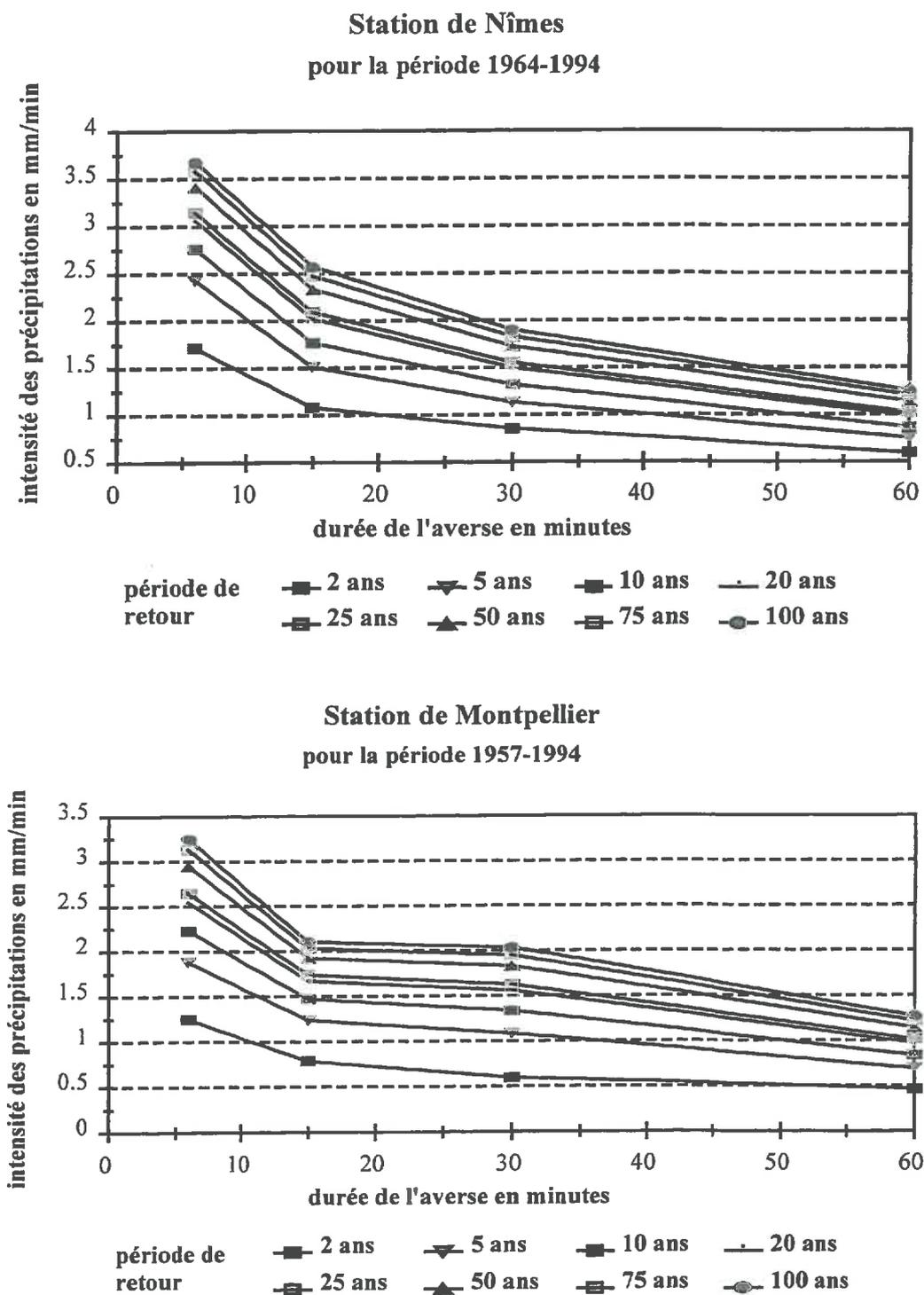


Figure 3. 8 : Courbes intensité - durée des averses pour différentes périodes de retour pour les stations de Nîmes et Montpellier

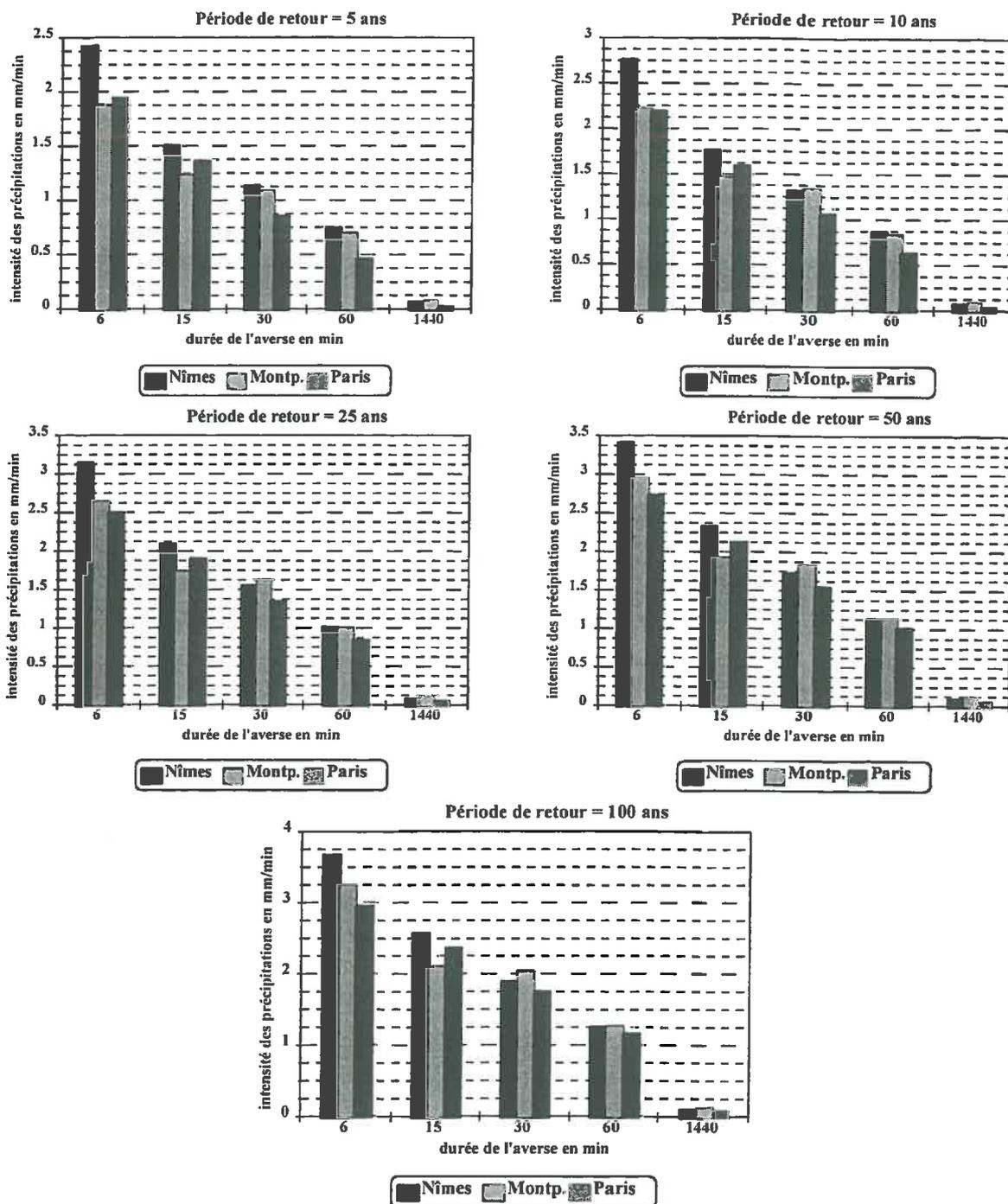


Figure 3. 9 : Comparaison des intensités de précipitations - durées des averses pour les stations de Nîmes Montpellier et Paris pour différentes périodes de retour

#### 4.1.2. Evénements pluvieux

##### 4.1.2.1. *Rappels historiques*

Sur la période 1958-1994, il y a eu dans le département de l'Hérault 38 événements pluvieux, dont la hauteur des précipitations a été supérieure à 200 mm en 24 h. Pour le département du

Gard ce nombre est de 45 et il est de 34 pour la Lozère, certains événements concernant toutefois plusieurs départements.

Sur cette même période, 1958-1994, il y a eu, au total, 119 événements pluvieux supérieurs à 200 mm en 24 h pour les régions Languedoc-Roussillon et Alpes - Cote d'Azur.

Certaines années, on observe même des successions d'épisodes pluvieux supérieurs à 200 mm par 24h dans certains départements, voir sur la même commune. Les années remarquables sont, pour les plus récentes :

- 1964 4 événements dans l'Hérault ;
- 1966 2 événements sur l'Hérault, les 27/28 septembre et le 4 octobre ;
- 1969 7 événements dans l'Hérault dont 2 en 5 jours au mois d'octobre le 13 octobre et les 17/18 octobre ;
- 1976 sur 8 événements, 2 concernent l'Hérault, 3 le Gard et 3 la Lozère ;
- 1992 sur 4 événements, 2 concernent l'Hérault le 21 et le 26 septembre.

Le tableau 3.7 présente dans l'ordre chronologique les événements pluvieux supérieurs à 200 mm en 24 h ayant eu un large impact géographique (sur un ou plusieurs départements).

**Tableau 3. 7: Evénements pluvieux de grande ampleur géographique**

Années	Dates	Départements affectés	Communes ayant une station météo affectées dans le département de l'Hérault
1958	29/30 septembre	Hérault - Gard - Lozère	St. Maurice de Navacelle - le Caylar - Ganges - Joncel - Poujol
1963	30/31 octobre	Hérault - Gard - Lozère	Lodève - Avène - Campagne - Caylar - Ceilhes et Rocozels - Ganges
1964	24/25 février	Hérault - Gard - Lozère	Lodève (150,5 mm le 24/02) - Octon - Poujol
1964	23/24 mai	Hérault - Gard - Lozère	Castanet - Roquerodonde - St Maurice
1964	30 septembre / 1 octobre	Hérault - Gard - Lozère	Octon - Pezenes les Mines - St Martin de Londres
1965	24/25 septembre	Hérault - Gard - Lozère	Castanet le haut - Caylar - Fraisse sur Agout - Roquerodonde
1969	17/18 octobre	Hérault	Lodève (140 mm le 18/10)
1973	23/24 décembre	Hérault - Gard - Lozère - Pyrénées orientales	Cambon et Salvergues - St Maurice de Navacelle
1979	25/26 octobre	Hérault - Gard - Lozère	Roquerodonde - St Maurice de Navacelle
1982	6/7 novembre	Hérault - Gard - Lozère - Pyrénées orientales	Lodève
1986	13/14 octobre	Hérault - Gard - Lozère - Pyrénées orientales	Lodève (102,3 mm le 14/10)
1992	21 septembre	Hérault - Gard - Lozère	Le Caylar
1994	22/23 septembre	Hérault - Gard - Lozère	Roquerodonde - Lunas
1994	19/20 octobre	Hérault - Gard - Lozère	St Maurice de Navacelle
1994	3/4 novembre	Hérault - Gard - Lozère	Roquerodonde

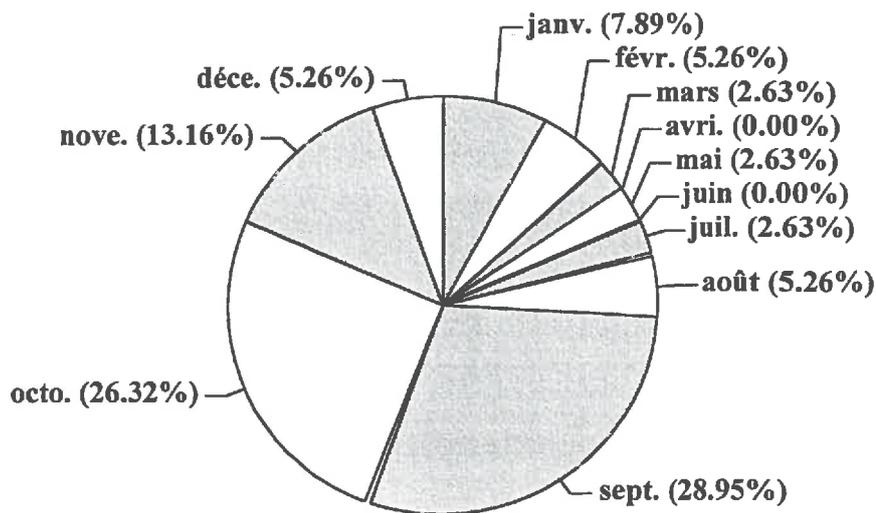
Nota : la station de Lodève est à 162 m d'altitude, celle de Roquerodonde est à 680 m.

Si on sélectionne seulement les épisodes pluvieux supérieurs à 400 mm sur 1 ou 2 jours, on en retrouve 4 entre 1958 et 1994 dans le département de l'Hérault.

- 1965	24/25 septembre	Roquerodonde	413 mm dont 213 mm le 24 et 200 mm le 25;
- 1982	6/7 novembre	Roquerodonde	509 mm dont 117 mm le 6 et 392 mm le 7;
- 1992	21 septembre	Le Caylar	448 mm;
- 1994	19/20 octobre	Laroque	416 mm dont 316 mm le 19 et 90 mm le 20.

Enfin si on observe la répartition mensuelle des événements pluvieux supérieurs à 200 mm en 24 h pour la période 1958-1994, on remarque que ces événements sont plus fréquents certains mois. Cette répartition est présentée dans la figure 3.10.

### Département de l'Hérault



**Figure 3. 10 : Répartition mensuelle des événements pluvieux supérieurs à 200 mm en 24 h**

En faisant le total des mois de juillet, août, septembre et octobre, on obtient 63,16 % pour le département de l'Hérault et 58,77 % pour la région Languedoc-Roussillon. Il y a donc plus d'une chance sur 2 que les averses violentes surviennent après une période sèche. L'érosion résultant de ces averses est alors plus importante puisque l'érodabilité des sols est plus grande.

#### 4.1.2.2. Etudes statistiques

À partir des valeurs records annuelles des précipitations quotidiennes, il s'agit d'établir les valeurs de périodes de retour beaucoup plus grandes comme l'averse centennale ou millennale.

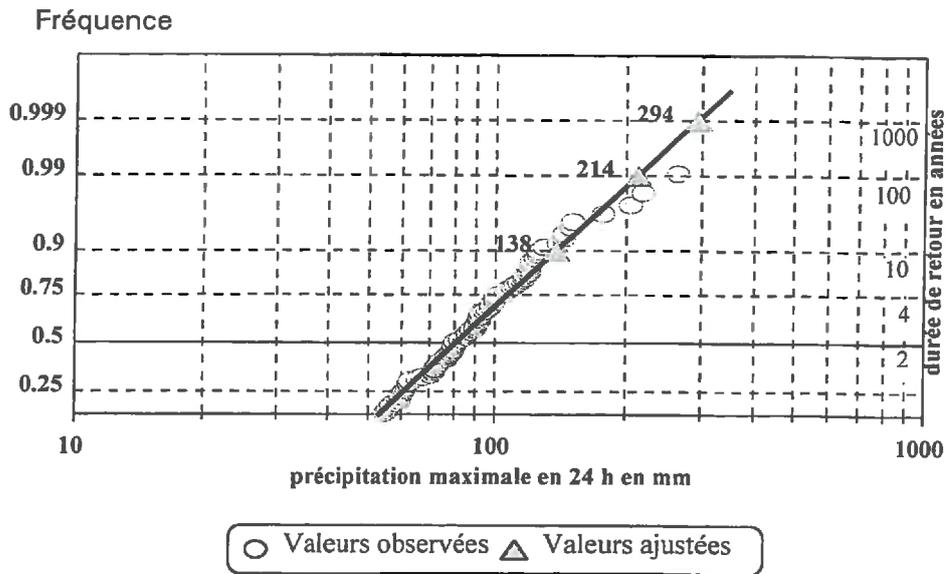
Les distributions statistiques utilisées sont la loi log-normale et la loi de Gumbel. L'intervalle de confiance des extrapolations est également calculé pour la loi de Gumbel. Pour diminuer l'aléa statistique, il convient d'utiliser de longues séries de données. Ces longues séries n'existent pas toujours sur les stations locales. Afin de les reconstituer, nous utilisons la méthode dites des stations-années (cf. paragraphe 2.2.2).

Les stations utilisées dans notre étude sont (voir tableau 3.8) : Nîmes (période 1964-1994), Montpellier (période 1957-1994) et Le Bousquet d'Orb (période 1949-1995).

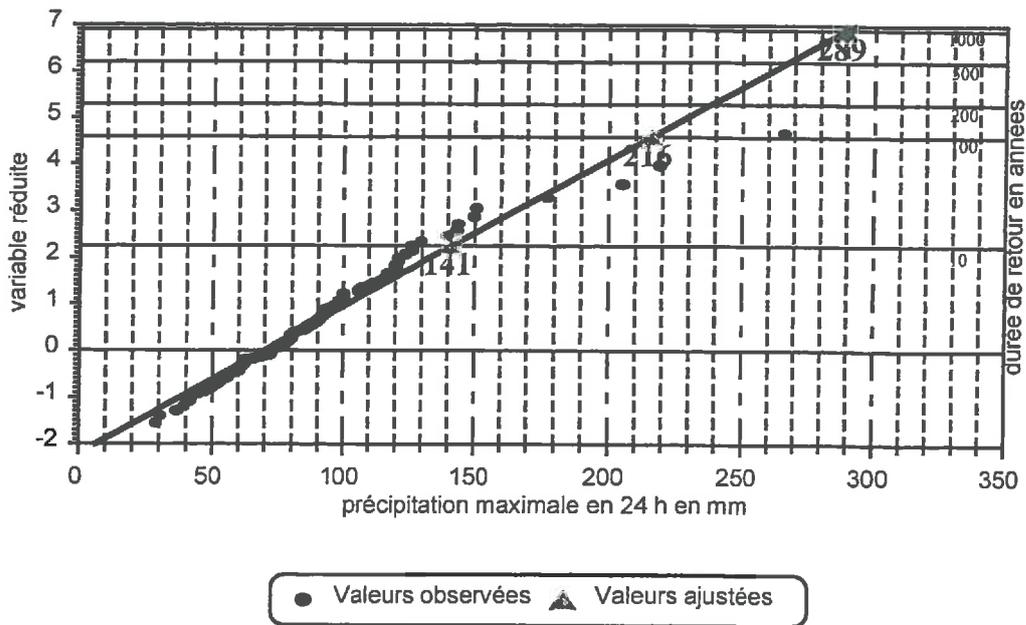
**Tableau 3. 8 : Précipitations maximales quotidiennes à Nîmes, Montpellier et le Bousquet d'Orb**

Stations	Montpellier	Nîmes	Le Bousquet d'Orb
années	précipitations maximales sur 24 h en mm	précipitations maximales sur 24 h en mm	précipitations maximales sur 24 h en mm
1949			37
1950			100
1951			92
1952			62
1953			150
1954			52
1955			86
1956			106
1957	84.9		114
1958	40.3		107
1959	111.7		93
1960	61.7		47
1961	86.3		90
1962	90.4		126
1963	143.4		71
1964	79.8	98.4	124
1965	79.5	61.1	91
1966	72.2	50.4	85
1967	62.9	56.8	93
1968	177.2	73.3	60
1969	91.7	72.4	120
1970	55.7	72.4	60
1971	121.2	59.3	95
1972	67.8	60.0	100
1973	55.0	150.9	100
1974	73.4	77.2	80
1975	61.3	57.9	42
1976	100.3	92.2	74
1977	52.9	116.8	120
1978	130.0	96.3	140
1979	205.0	83.0	92
1980	77.1	50.0	80
1981	-	-	77
1982	62.5	74.6	106
1983	52.0	110.1	116
1984	62.7	98.2	79
1985	-	78.2	45
1986	72.2	87.7	81
1987	98.0	119.7	117
1988	-	266.2	43
1989	-	-	81
1990	65.8	39.4	144
1991	-	28.8	48
1992	30.4	42.0	219
1993	89.9	53.8	80
1994	88.0	56.2	121
1995			126

**Ajustement des précipitations  
maximales en 24h à une loi log-normale**



**Ajustement des précipitations  
maximales en 24 h à une loi de Gumbel**



**Figure 3. 11 : Ajustement des précipitations maximales quotidiennes à la loi log-normale et à la loi de Gumbel**

Nous avons vérifié que les relevés des précipitations annuelles maximales sur 24 h, étaient effectivement indépendants sur le plan statistique. Pour cela, nous avons établi la matrice des corrélations, voir tableau 3.9 (chaque coefficient est égal à la covariance  $(x_1, x_2)$  divisée par les écarts type des série  $x_1$  et  $x_2$ ).

Les coefficients nettement inférieurs à 0,6 montrent qu'il n'y a pas de corrélation statistique des 3 séries de valeurs.

**Tableau 3. 9 : Matrice des coefficients de corrélation entre les séries de Nîmes, Montpellier et le Bousquet d'Orb**

	Montpellier	Nîmes	Le Bousquet d'Orb
Montpellier	1		
Nîmes	0.022	1	
Le Bousquet d'Orb	0.138	-0.118	1

Nous avons ensuite ajusté la loi log-normale et la loi de Gumbel à l'ensemble des valeurs (109 valeurs non nulles). Pour les ajustements, les fréquences utilisées sont les fréquences empiriques de la forme  $1/n+1$ .

La figure 3.11 donne les résultats de ces ajustements.

On remarque que l'alignement des points est assez bon. Seuls trois événements pluvieux : 266,2 mm (Nîmes, 1988), 219 mm (Le Bousquet d'Orb, 1992) et 205 mm (Montpellier, 1979) semblent s'écarter de la droite d'ajustement. Cela peut signifier que ces valeurs ont statistiquement des périodes de retour plus longues que celles observées historiquement.

D'après chacun de ces ajustements, on peut donner les valeurs des précipitations pour une période de retour décennale, centennale et millennale (cf. tableau 3.10).

**Tableau 3. 10 : Précipitations quotidiennes maximales (en mm) d'après les ajustements**

Période de retour en années	Ajustement à la loi log-normale	Ajustement à la loi de Gumbel
10	138	141
100	214	216
1000	294	289

Pour l'ajustement à la loi de Gumbel nous avons calculé l'intervalle de confiance des extrapolations. Ainsi on peut, par exemple, conclure : il y a 70 % de chance que l'averse quotidienne millennale soit comprise entre  $P_{inf}$  : 269 mm et  $P_{sup}$  : 312 mm . Ces calculs sont présentés dans le tableau 3.11.

**Tableau 3. 11 : Intervalles de confiance à 95 % et 70 % des ajustements pour la loi de Gumbel**

à 95 % pour 109 valeurs		Précipitations en mm d'après l'ajustement			
période en années	C1	C2		borne inf.	borne sup.
1000	1.28	1.00	289	251.12	337.49
100	0.90	0.50	216	197.06	250.10
10	0.52	0.38	141	126.60	160.70

à 70 % pour 109 valeurs			Précipitations en mm d'après l'ajustement		
période en années	C1	C2		borne inf	borne sup
1000	0.60	0.51	289	269.68	311.73
100	0.40	0.33	216	203.50	231.15
10	0.23	0.18	141	134.18	149.71

Nous pouvons donc conclure que les ajustements des lois de Gumbel ou log-normale sont voisins. En effet les valeurs obtenues avec la loi log-normale (138 mm, 214 mm et 294 mm) sont incluses dans l'intervalle de confiance à 70 % des ajustements de Gumbel.

Ces valeurs sont également cohérentes avec la réalité historique régionale des stations météorologiques situées à une altitude voisine (cf. paragraphe 4.1.2.1.)

#### 4.1.3. Érosivité des averses statistiques prévisibles

Pour le site de St. Martin du Bosq (d'après les résultats du paragraphe 4.1.2.2), les averses statistiquement prévisibles peuvent être prises égales aux valeurs suivantes :

- l'averse quotidienne décennale : 145 mm ;
- l'averse quotidienne centennale : 220 mm ;
- l'averse quotidienne millennale : 300 mm.

Si on suppose que ces 3 averses ont un hyétogramme d'allure similaire à celui de l'averse du Mont Lozère présentée au paragraphe 1.2 (cf. figure 3.12), leur érosivité EI respective sera de 49, 122 et 239 (en  $t.m.ha^{-1}.cm.h^{-1}$ ).

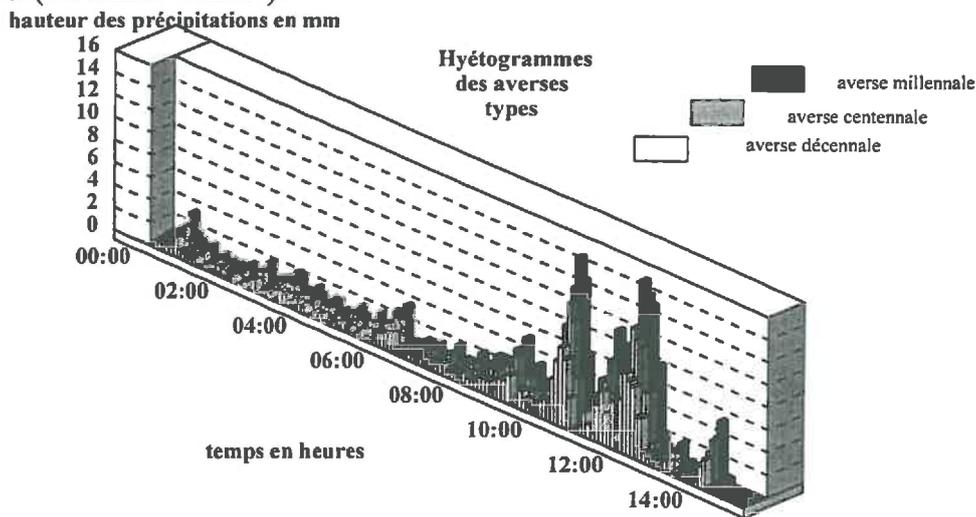


Figure 3. 12 : Hyétogramme des averses types

A partir de ces indices d'érosivité, nous pouvons calculer en tenant compte de certaines hypothèses l'érosion d'un type de recouvrement.

## 4.2. Erosion

Le calcul de l'érosion dépend très étroitement des matériaux utilisés en surface du recouvrement et de la géométrie de ce recouvrement.

Les matériaux n'étant pas encore choisis, nous avons donc réalisé une étude paramétrique de l'érosion. Nous essayerons de mettre en évidence les paramètres les plus sensibles du calcul de l'érosion.

La géométrie du recouvrement est partiellement déterminée par la forme du stockage, nous avons donc imposé la longueur de la pente de la couverture.

Nous allons également comparer l'effet d'une averse particulièrement violente à l'effet érosif d'une année moyenne

Le stockage considéré a été réalisé dans 2 fosses qui sont parallèles et qui ont une longueur de 525 m environ pour une largeur totale de 250 m soit une surface d'environ 13 hectares.

Nous rappelons la formule utilisée pour le calcul et présentée au paragraphe 3.1.

$$E = R \cdot K \cdot (L \cdot S) \cdot (C \cdot P)$$

### 4.2.1. Paramètre d'érosivité : R ou EI

Ce paramètre caractérise l'érosivité de la période considérée.

Le paramètre EI est fixé aux valeurs de 49, 122 et 239 t.m.ha<sup>-1</sup>.cm.h<sup>-1</sup> respectivement pour les averses décennale, centennale et millennale (voir paragraphe 4.1.3).

Le paramètre R est fixé à 200 t.m.ha<sup>-1</sup>.cm.h<sup>-1</sup> pour l'année pluviométrique moyenne (voir carte de la figure 3.2).

Nous utiliserons donc 4 valeurs pour le paramètre d'érosivité dans le calcul de l'érosion annuelle ou résultant d'une averse.

### 4.2.2. Paramètre K

Le paramètre dépend de la granulométrie des matériaux choisis pour réaliser la partie superficielle de la couverture. Ces matériaux ne sont pas encore choisis. Toutefois il semblerait que les matériaux utilisés soient obtenus à partir des « argilites rouges » soit en l'état, soit après tri et ou concassage. Ces « argilites » font partie de la sédimentation permienne du bassin de Lodève. Elles ont été étudiées par S. Baudu (1995) et J. Ménezes (1996). Elles ont été extraites pendant l'exploitation du site minier. Elles ont une granulométrie très étalée puisque des blocs décimétriques existent. Toutefois, on supposera que le comportement vis à vis de l'érosion est contrôlé par la fraction fine des terrains. La granulométrie de ces terrains est délicate à obtenir car le simple échantillonnage et remaniement lié au tamisage la modifie. En effet ce matériau est très friable à sec et lors d'un mouillage. La figure 3.13 donne une bonne approximation de la courbe granulométrique moyenne de la fraction inférieure à 20 mm de ces argilites rouges. Cette courbe est une synthèse obtenue à partir de l'analyse de plusieurs échantillons répartis en surface sur les versants et en profondeur.

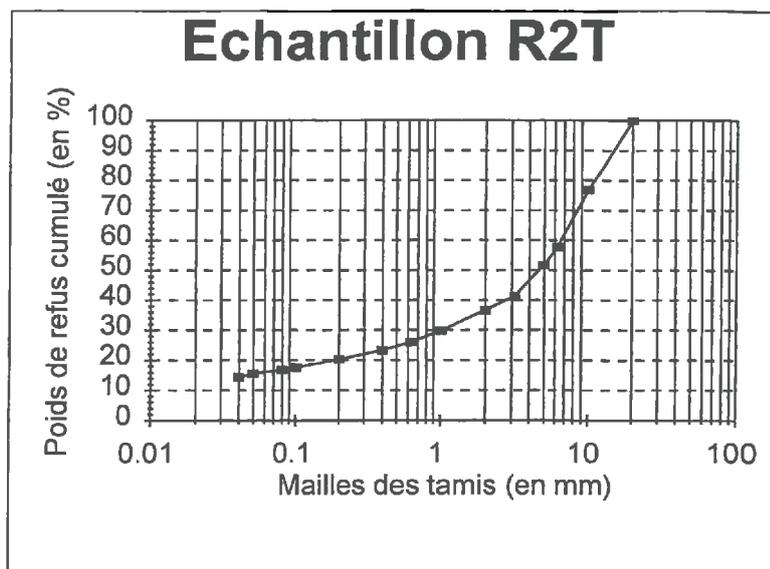


Figure 3. 13 : Courbe granulométrique de l'échantillon R2T (d'après J Ménézes, 1996)

Si l'on ne considère que la fraction inférieure à 2 mm avec les coupures suivantes :

- sable de 0,05 à 2 mm,
- silt de 0,002 à 0,05 mm,
- argile taille inférieure à 0,002 mm,

on obtient la répartition suivante :

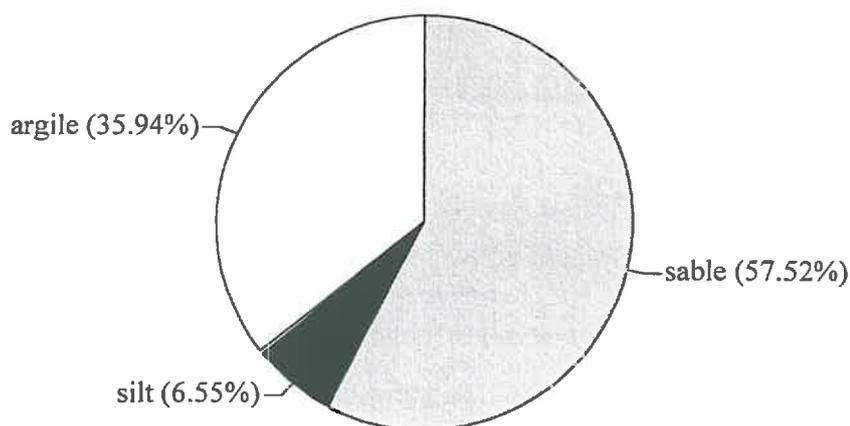


Figure 3. 14 : Répartition des fines de l'échantillon de sol

Nous sommes donc en présence d'une argile sableuse. Le coefficient K correspondant d'après le tableau 3.5 est de 0,14 car la teneur en matière organique est très faible. Pour un limon argileux sableux cette valeur est de 0,27.

Ces 2 valeurs serviront de fourchette dans nos calculs.

#### 4.2.3. Paramètres LS

Ce paramètre dépend de la géométrie de la couverture. La géométrie envisagée est un pan unique de pente faible. La longueur de ce pan sera d'environ 525 m. La pente n'est pas encore définie mais elle sera probablement comprise entre 5 et 10 %. Cette fourchette sera prise en compte pour les calculs.

#### 4.2.4. Paramètres C, P

Ces paramètres sont plutôt destinés aux calculs des agronomes. En effet, ils permettent de tenir compte de la protection jouée par le couvert végétal et des techniques agraires du type : labour le long des lignes de niveau. Le paramètre C sera pris égal à 0,05 qui est la valeur correspondante à une couverture de ray-grass temporaire. Nous savons qu'une végétation dense serait plus favorable mais la végétation naturelle dans cette région est plutôt clairsemée. Le paramètre P sera pris égal à 1 car il n'y a pas de travail agricole de prévu.

#### 4.2.5. Résultats et interprétations

Nous rappelons pour mémoire, la valeur d'érosion de 11 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ou 1,1 kg.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> qui est d'après de nombreux auteurs la limite en deçà de laquelle il n'y a pas de régénération possible des sols.

**Tableau 3. 12 : Calcul de l'érosion**

Paramètres	R ou EI en t.m.ha <sup>-1</sup> .cm.h <sup>-1</sup>	K	L en m	S en %	LS	C	P	Erosion en t.ha <sup>-1</sup>
averse millennale	239	0.27	525	10	5.67	0.05	1	18.29
averse millennale	239	0.27	525	9	4.85	0.05	1	15.65
averse millennale	239	0.27	525	8	4.09	0.05	1	13.21
averse millennale	239	0.27	525	7	3.40	0.05	1	10.97
averse millennale	239	0.27	525	6	2.77	0.05	1	8.94
averse millennale	239	0.27	525	5	2.20	0.05	1	7.11
averse millennale	239	0.27	525	7	3.40	0.05	1	10.97
averse millennale	239	0.25	525	7	3.40	0.05	1	10.16
averse millennale	239	0.23	525	7	3.40	0.05	1	9.35
averse millennale	239	0.21	525	7	3.40	0.05	1	8.53
averse millennale	239	0.19	525	7	3.40	0.05	1	7.72
averse millennale	239	0.17	525	7	3.40	0.05	1	6.91
averse millennale	239	0.14	525	7	3.40	0.05	1	5.69
averse centennale	122	0.27	525	10	5.67	0.05	1	9.34
averse centennale	122	0.27	525	9	4.85	0.05	1	7.99
averse centennale	122	0.27	525	8	4.09	0.05	1	6.74
averse centennale	122	0.27	525	7	3.40	0.05	1	5.60
averse centennale	122	0.27	525	6	2.77	0.05	1	4.56
averse centennale	122	0.27	525	5	2.20	0.05	1	3.63
averse centennale	122	0.27	525	7	3.40	0.05	1	5.60
averse centennale	122	0.25	525	7	3.40	0.05	1	5.19

Paramètres	R ou EI en t.m.ha <sup>-1</sup> .cm.h <sup>-1</sup>	K	L en m	S en %	L.S	C	P	Erosion en t.ha <sup>-1</sup>
averse centennale	122	0.23	525	7	3.40	0.05	1	4.77
averse centennale	122	0.21	525	7	3.40	0.05	1	4.36
averse centennale	122	0.19	525	7	3.40	0.05	1	3.94
averse centennale	122	0.17	525	7	3.40	0.05	1	3.53
averse centennale	122	0.14	525	7	3.40	0.05	1	2.90
averse décennale	49	0.27	525	10	5.67	0.05	1	3.75
averse décennale	49	0.27	525	9	4.85	0.05	1	3.21
averse décennale	49	0.27	525	8	4.09	0.05	1	2.71
averse décennale	49	0.27	525	7	3.40	0.05	1	2.25
averse décennale	49	0.27	525	6	2.77	0.05	1	1.83
averse décennale	49	0.27	525	5	2.20	0.05	1	1.46
averse décennale	49	0.27	525	7	3.40	0.05	1	2.25
averse décennale	49	0.25	525	7	3.40	0.05	1	2.08
averse décennale	49	0.23	525	7	3.40	0.05	1	1.92
averse décennale	49	0.21	525	7	3.40	0.05	1	1.75
averse décennale	49	0.19	525	7	3.40	0.05	1	1.58
averse décennale	49	0.17	525	7	3.40	0.05	1	1.42
averse décennale	49	0.14	525	7	3.40	0.05	1	1.17

Paramètres	R ou EI en t.m.ha <sup>-1</sup> .cm.h <sup>-1</sup>	K	L en m	S en %	L.S	C	P	Erosion en t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>
moyenne annuelle	200	0.27	525	10	5.67	0.05	1	15.30
moyenne annuelle	200	0.27	525	9	4.85	0.05	1	13.09
moyenne annuelle	200	0.27	525	8	4.09	0.05	1	11.05
moyenne annuelle	200	0.27	525	7	3.40	0.05	1	9.18
moyenne annuelle	200	0.27	525	6	2.77	0.05	1	7.48
moyenne annuelle	200	0.27	525	5	2.20	0.05	1	5.95
moyenne annuelle	200	0.27	525	7	3.40	0.05	1	9.18
moyenne annuelle	200	0.25	525	7	3.40	0.05	1	8.50
moyenne annuelle	200	0.23	525	7	3.40	0.05	1	7.82
moyenne annuelle	200	0.21	525	7	3.40	0.05	1	7.14
moyenne annuelle	200	0.19	525	7	3.40	0.05	1	6.46
moyenne annuelle	200	0.17	525	7	3.40	0.05	1	5.78
moyenne annuelle	200	0.14	525	7	3.40	0.05	1	4.76

Si l'on analyse les résultats de chaque type d'averse on remarque déjà des éléments importants.

Pour l'averse millennale, avec un coefficient d'érodabilité K égal à 0,27, pour une pente supérieure à 7 %, l'érosion calculée dépasse la valeur critique de 11 t.ha<sup>-1</sup>. Hors ce phénomène est concentré sur une journée et non pas sur l'année, ce qui signifie que le décapage résultant de cette averse sera d'autant plus néfaste sur la couche végétale

et qu'il mettra probablement en péril la végétation pour plusieurs années. On remarque toutefois que pour cette averse, si la pente est égale (voire inférieure à 7 %), et si K varie entre 0,14 et 0,27, l'érosion est inférieure à la valeur critique et donc nettement moins dangereuse pour la couverture végétale.

Pour l'averse centennale et l'averse décennale, même avec une pente de 10 %, l'érosion est inférieure à 11 t.ha<sup>-1</sup>. Toutefois l'érosion est importante. On rappelle que, par exemple, 9 t.ha<sup>-1</sup> représente une pellicule de 0,6 mm et un volume total pour le site considéré de 80 m<sup>3</sup> environ. Cette quantité de matériaux pourrait évidemment nuire de façon importante à l'aménagement du site (obturation du réseaux de collecte des eaux, encombrement des voies d'accès,...).

Pour l'année pluviométrique moyenne, avec un coefficient d'érodabilité K égal à 0,27, pour une pente de 8 %, l'érosion calculée dépasse la valeur critique de 11 t.ha<sup>-1</sup>. Toutefois pour une pente de 7 % et quelque soit K compris entre 0,14 et 0,27, l'érosion est inférieure à cette valeur critique.

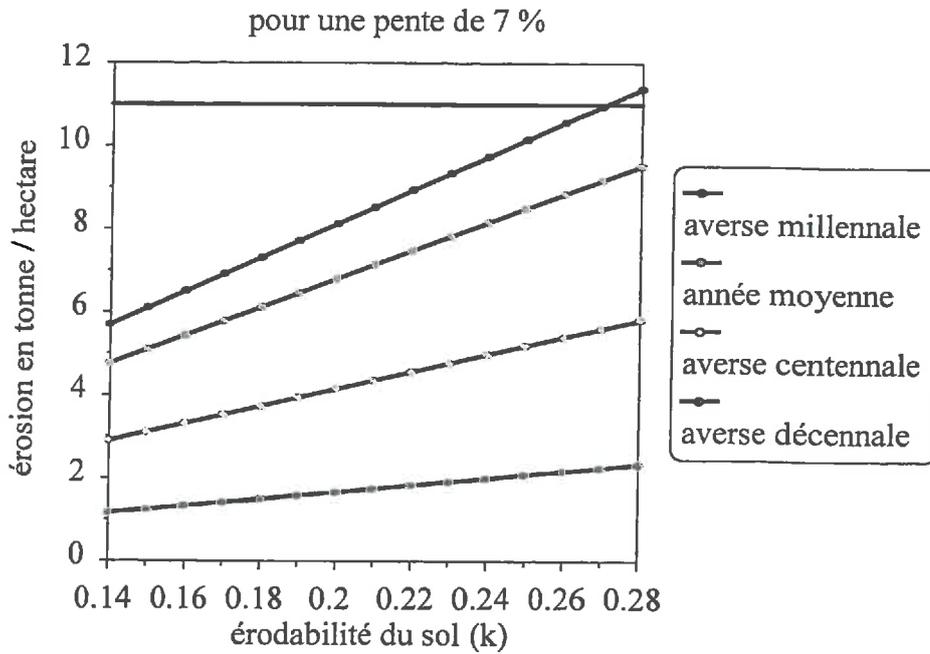
Pour comparer l'érosion induite par les différentes averses, il suffit de comparer le paramètre d'érosivité de l'équation puisque tous les autres paramètres sont égaux par ailleurs.

Ainsi on remarque que le décapage liée à l'averse millennale est légèrement supérieur à celui d'une année moyenne : l'érosivité est égale à 239 au lieu de 200 soit environ 20 % de plus mais l'érosion est alors concentrée sur une journée ! L'érosion de l'averse centennale représente 60 % de celle de l'année moyenne alors que l'érosion de l'averse décennale représente 24 % de l'érosion moyenne annuelle. A partir de ces données, on peut peut-être estimer ou valider les résultats les moins fréquents. Par exemple si une planche d'essai recevait une averse décennale, on pourrait estimer l'érosion induite par l'averse millennale à 4 ou 5 fois celle produite par l'averse reçue.

On peut également comparer l'impact de la variation de chaque paramètre de l'équation de Wischmeier sur le résultat afin de mettre en évidence les paramètres critiques de l'érosion ou ceux que l'on est le plus tenter de modifier en fonction de leur coût. Nous ferons cette analyse en conservant l'ordre des coefficients de l'équation.

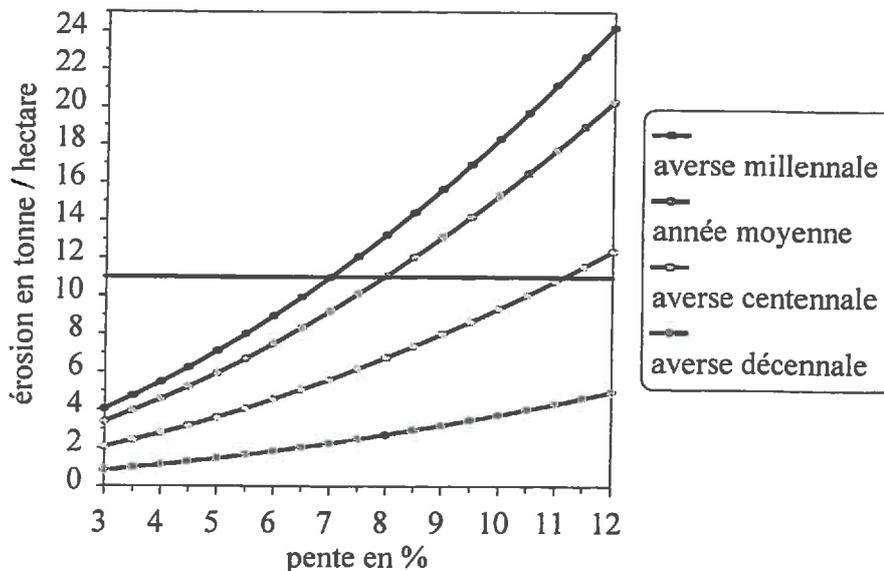
Seul le climat entre dans l'évaluation du paramètre R ou EI (pour les averses ponctuelles) donc il n'est pas utile de l'analyser.

L'érodabilité du sol (paramètre K) dépend essentiellement de la granulométrie, de la minéralogie et de la teneur en matière organique. Dans le cas étudié le matériaux est assez argileux ce qui semble limiter les variations du paramètre entre 0,14 et 0,27. Cela signifie tout de même qu'une mauvaise connaissance du matériaux peut entraîner une " erreur " d'appréciation de l'érosion voisine de 100 %. On remarque que pour des matériaux limoneux (cf. tableau 3.5) ce phénomène est plus important encore. En effet pour un sable limoneux K est égal à 0,12 et pour un limon silteux K est égal à 0,48 (l'érosion peut donc varier de 1 à 4). Il faut également supposer que la granulométrie et la teneur en matière organique des matériaux sont constantes dans le temps. Pour toutes ces raisons, il est prudent de considérer un intervalle de variation pour ce coefficient.



**Figure 3. 15 : Evaluation de l'érosion en fonction de l'érodabilité du sol pour une pente de 7%**

Le paramètre LS tient compte de la longueur de la pente (fixée par la géométrie du stockage) et de sa pente. On remarque qu'en faisant varier la pente de 5 à 10 %, le facteur LS passe de 2,2 à 5,67 (multiplication par 2,6) ce qui implique que la quantité érodée est également multipliée par 2,6. Il est donc prépondérant de minimiser la pente puisque l'accroissement de la pente entraîne une augmentation de l'érosion d'un facteur multiplicatif supérieur à l'unité (cf. paragraphe 3.1)  
pour un "limon argileux sableux"  $K=0,27$



**Figure 3. 16 : Evaluation de l'érosion en fonction de la pente pour une érodabilité de 0,27**

Le paramètre C qui tient compte de l'effet des cultures n'a pas lieu d'être modifié. En effet ce paramètre est surtout valide en domaine agricole, sur un site de stockage de déchets ces pratiques ne seront pas vraiment encouragées. De plus comme la végétation concernée ne doit pas avoir de système racinaire trop profond, on ne peut garantir sur le long terme qu'une couverture végétale herbacée.

Enfin le paramètre P qui tient compte des pratiques anti-érosives est très important. Nous l'avons choisi dans notre calcul toujours égal à 1 afin de faire abstraction des aménagements précis que mettra en œuvre le gestionnaire du stockage mais comme on peut le voir sur le tableau 3.6, l'érosion peut être divisée par 2 par des aménagements ou une végétalisation perpendiculaire à la pente. Ces techniques simples de terrassements et de plantation ont déjà été utilisées sur d'autres sites de stockage (Ecarpière en Vendée). C'est sûrement sur ce paramètre que le gestionnaire du stockage a intérêt de travailler car c'est, a priori, les modifications les moins coûteuses à réaliser pour améliorer la lutte contre l'érosion de la couverture.

On pourrait donc conclure, à partir de cette approche que le choix d'une pente de 7 % serait judicieux. Toutefois, si l'on veut réaliser une pente d'environ 10 %, il faut soit légèrement modifier les matériaux constitutifs des terrains superficiels, soit disposer une terrasse à mi-pente.

## 5. Conclusion

Nous avons essayé de voir dans ce chapitre comment prendre en compte le risque érosif dû aux averses « violentes » lors de la conception des couvertures de stockages de déchets ou de résidus miniers. Pour cela nous avons utilisé différents outils qui relèvent pour certains des sciences et pour d'autres de techniques. Ils ont donc bien des aspects imprécis. Nous rappelons, lors de l'évaluation du phénomène climatique, les problèmes d'existence de données, du recueil et du traitement de ces données. De même dans le cadre de l'étude statistique des averses, nous essayons de mettre en relief les incertitudes (aléas et extrapolations). Nous avons choisi de travailler à partir des données de hauteur de précipitations maximales annuelles, ceci n'est qu'une des méthodes utilisables dans ce contexte. En effet nous aurions pu traiter le même problème à partir des hauteurs de précipitations supérieures à un seuil (Laborde, 1996). De plus, nous n'avons essayé d'ajuster que 2 lois statistiques : la loi log-normale et la loi de Gumbel. Bien que ces lois sont les plus fréquemment utilisées, nous aurions pu compléter ces calculs par d'autres ajustements. Enfin nous n'avons calculé l'érosivité des averses qu'à partir d'un seul hyétogramme. Nous aurions également pu étudier l'influence des différents paramètres de l'averse : durée, intensité moyenne et intensité maximale, et leurs effets sur la valeur de l'érosivité et donc de l'érosion.

En ce qui concerne l'équation de perte en terre, elle cumule l'imprécision de 5 paramètres. Il faut donc être très prudent quant aux conclusions tirées de ces calculs. Toutefois, et grâce à un exemple concret, nous montrons comment ces outils peuvent être adaptés aux problèmes du dimensionnement des couvertures de stockage, comme cela a déjà été fait pour les talus routiers. Ainsi, il semble possible d'évaluer l'érosion résultante d'une averse sur une structure. On peut alors étudier quelle variante du stockage sera le moins susceptible d'être érodée. De ce fait, dans le choix de variantes, le risque érosif devrait être pris en compte comme les autres facteurs quantitatifs (emprise des terrains, coût, délais...) et ne devrait plus être négligé du fait de son aspect qualitatif.

## Chapitre 4 - Prédiction des épaisseurs de gel

---

Pour prédire l'épaisseur de sol gelé en un lieu au cours d'un hiver on peut utiliser 2 méthodes. La première consiste à relever la température dans le sol en ce lieu à différentes profondeurs et à réaliser un ajustement statistique sur ces données. La deuxième fait intervenir la notion d'indice de gel. Nous avons appliqué la première méthode à la station de Paris - Montsouris qui dispose de la série de données nécessaires (paragraphe 1) alors que la deuxième a été appliquée à un site situé dans l'Est de la France (paragraphe 2 à 4). La confrontation des 2 méthodes permettra de mieux comprendre les avantages de chacune d'elles.

### 1. Prédiction des épaisseurs de gel à partir de la température du sol

Cette méthode consiste simplement à traiter des données de température du sol afin d'en déduire les profondeurs de gel, décennal et centennal par exemple. Les méthodes statistiques utilisées ont été présentées au chapitre 3.

#### 1.1. Exemple de calcul : Paris - Montsouris

Cette station a été choisie car c'est une des plus anciennes stations françaises à relever la température du sol.

##### 1.1.1. Données

La température sous le sol de la station météorologique de Paris - Montsouris est relevée depuis 1879. Cette station en milieu urbain est construite sur des remblais dont la composition exacte n'est pas connue.

Entre 1899 et 1977 le sol de Paris - Montsouris a gelé à 30 cm de profondeur au cours de 12 hivers. Auparavant, pendant l'hiver 1879-1880, il y avait eu 35 jours avec gelée à 30 cm. De même pendant l'hiver 1890-1891, sans épaisseur appréciable de neige en France, la couche gelée atteignit 90 cm de profondeur dans le Nord du pays.

A 60 cm, dans le sol à Paris - Montsouris on n'observe plus que 2 hivers avec gelée sur la période 1914-1977 et cela pendant les hivers 1917-18 et 1963-64.

A 1 m pour ces deux hivers rigoureux les minimales de Paris - Montsouris, sont respectivement de 1,8 et 1,7 °C.

Le tableau 4.1 présente l'ensemble des valeurs de températures utilisées pour les ajustements. On notera qu'à partir de 1977, la température n'est plus relevée à 30 et 60 cm de profondeur mais à 20 cm et à 50 cm ce qui rend l'utilisation des données correspondantes impossible.

**Tableau 4.1 : Minimum absolu annuel des températures en °C à différentes profondeurs à la station de Paris - Montsouris (d'après Garnier, 1982).**

Années	à 30 cm	à 60 cm	à 100 cm	Années	à 30 cm	à 60 cm	à 100 cm
1879	-3.7			1947	-1.7	0.8	3.1
1880	-3.7			1948	1.1	2.9	6.0
1899	1.9			1949	0.8	2.3	5.2
1900	1.0			1950	0.6	2.4	5.5
1901	0.6		3.8	1951	1.2	2.8	5.7
1902	1.0		3.0	1952	1.7	3.0	5.6
1903	1.4		4.0	1953	1.3	2.7	5.3
1904	1.4		3.5	1954	-2.1	0.7	3.9
1905	1.6		4.2	1955	1.6	2.8	5.2
1906	2.2		4.6	1956	-1.4	0.5	3.4
1907	0.8		3.2	1957	0.2	1.9	4.9
1908	0.8		3.4	1958	1.7	3.2	6.1
1909	1.0		2.9	1959	0.9	1.9	4.7
1910	1.8		4.4	1960	1.3	3.0	5.9
1911	1.0		3.5	1961	2.0	3.5	6.1
1912	1.9		5.0	1962	1.7	3.4	5.9
1913	1.7		4.3	1963	-2.8	-0.2	1.7
1914	0.1		3.1	1964	1.0	2.7	4.2
1915	1.5	3.2	5.0	1965	1.3	2.6	3.9
1916	2.5	3.5	4.9	1966	-0.4	1.8	3.7
1917	-2.7	-0.2	1.8	1967	1.6	3.5	5.4
1918	0.6	1.9	3.7	1968	2.0	3.8	5.3
1919	0.1	1.6	3.1	1969	1.4	2.8	4.3
1920	2.5	4.1	5.4	1970	1.7	3.2	4.8
1921	1.3	2.8	4.7	1971	1.5	3.0	4.4
1922	1.1	2.6	4.4	1972	1.8	3.7	5.4
1923	2.6	3.9	5.2	1973	2.1	3.7	5.2
1924	1.0	2.1	3.6	1974	3.5	4.7	5.8
1925	2.1	3.5	5.1	1975	4.2	5.4	6.4
1926	1.0	2.4	4.1	1976	2.0	3.7	5.1
1927	1.3	2.4	4.1	1977	2.3	4.0	6.0
1928	0.7	2.7	4.7	1978			5.1
1929	-0.9	0.6	2.5	1979			5.0
1930	1.5	2.9	4.5	1980			5.6
1931	1.6	3.1	4.4	1981			4.9
1932	0.9	2.1	3.6				
1933	0.3	2.0	3.8				
1934	-0.2	1.7	3.5				
1935	1.6	3.3	5.1				
1936	1.4	2.8	4.5				
1937	2.7	3.9	5.8				
1938	1.0	2.4	4.2				
1939	0.7	2.4	3.5				
1940	-2.1	0.6	2.6				
1941	-0.2	1.2	3.1				
1942	-0.2	1.1	2.5				
1943	2.0	3.5	5.2				
1944	0.9	2.1	4.1				
1945	-0.2	1.3	3.6				
1946	0.3	2.0	4.0				

### 1.1.2. Ajustement statistique

Ces données ont été ajustées à deux lois de valeurs extrêmes, la loi de Gumbel et celle de Fréchet, afin d'extrapoler la température minimale pour une période de retour de 1000 ans. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 4.2 et la répartition des points observés autour des droites d'ajustement est représentée sur la figure 4.1.

**Tableau 4.2 : Synthèse de l'ajustement de la température minimale annuelle à différentes profondeurs à la station de Paris - Montsouris**

Période de retour	Variable réduite	LOI DE GUMBEL			LOI DE FRECHET		
		températures en °C			températures en °C		
		à 30 cm	à 60 cm	à 1 m	à 30 cm	à 60 cm	à 1 m
de 10 ans	2.2504	-1.1	0.9	2.9	-1.1	0.9	2.9
de 100 ans	4.6001	-4.0	-1.3	0.8	-4.0	-1.3	0.8
de 200 ans	5.2958	-4.9	-1.9	0.2	-4.8	-1.9	0.2
de 500 ans	6.2136	-6.0	-2.8	-0.5	-5.9	-2.8	-0.5
de 1000 ans	6.9073	-6.8	-3.5	-1.1	-6.7	-3.4	-1.1
R		0.97	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98

Dans ce tableau R est le coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson dont la formule est la suivante :

$$R = \frac{\frac{1}{n} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\left[ \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \cdot \sqrt{\left[ \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}}$$

Ce coefficient est appliqué à l'ensemble des points de la série de données, les x sont les températures ou leur logarithme et les y sont les valeurs des variables réduites.

On remarque que les résultats donnés par les deux ajustements sont très voisins. Ce n'est que pour la période de retour de 1000 ans que la différence est supérieure au vingtième de °C en restant inférieure au dixième.

Sur les graphiques montrant l'ajustement de la loi de Fréchet, la température est donnée en degré Kelvin afin de calculer son logarithme, avec la convention 0 °C = 273,2 K.

A partir des graphiques de la figure 4.1, on peut, par exemple, retrouver la fréquence d'une température donnée ou du gel à 30, 60 cm ou 1 m.

- Pour les graphiques des lois de Gumbel, la méthode est la suivante :
  - on choisit la température sur l'axe des abscisses, 0 °C par exemple, et on lit l'ordonnée correspondante pour la droite d'ajustement ;
  - pour la température à 30 cm de profondeur, la variable réduite sur l'axe des ordonnées est alors égale à 1,4 ;

- on applique alors la formule :

$$\text{Fréquence} = F = e^{-e^{-(\text{variable réduite})}} = e^{-e^{-1,4}} = 0,78$$

- la période de retour en année est égale à :

$$\frac{1}{F-1} = \frac{1}{0,78-1} = 4,57 \text{ ans.}$$

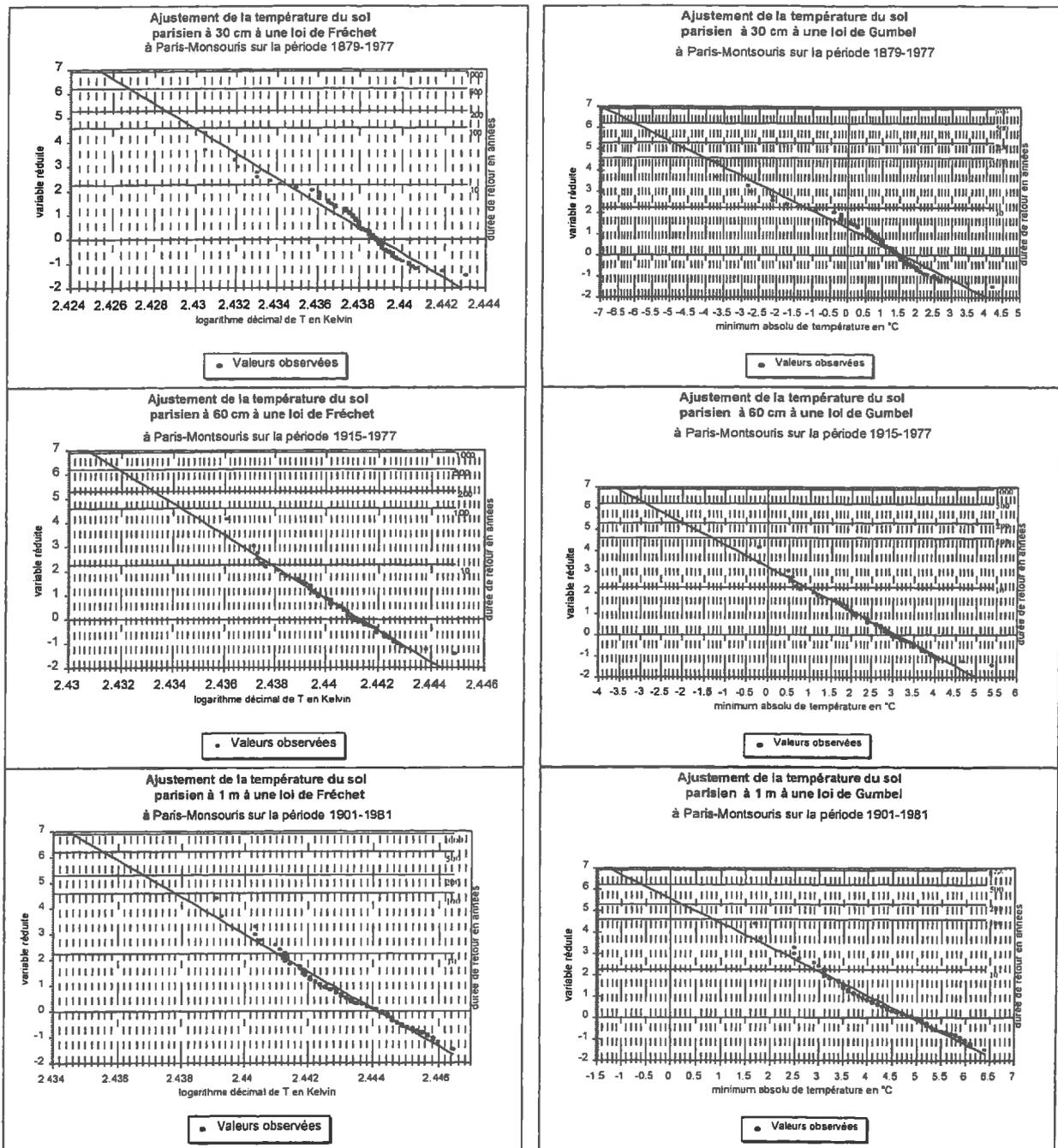


Figure 4. 1 : Ajustement aux lois de Gumbel et de Fréchet de la température minimale annuelle

- Pour les graphiques des lois de Fréchet, la méthode est similaire à la variante près qu'il faut calculer le logarithme décimal de la température en Kelvin :

$$\log (0 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,2) = \log (273,2 \text{ K}) = 2,436$$

$$F = e^{-e^{-1,6}} = 0,81$$

$$\frac{1}{0,81 - 1} = 5,46 \text{ ans .}$$

A la suite de cette étude on peut dire que globalement à la station de Paris - Montsouris le gel à 30 cm de profondeur a une période de retour de 4 à 6 ans. A 60 cm de profondeur le gel a une période de retour de 25 à 26 ans. Et à 1 m il a, d'après ces ajustements, une période de retour de 270 ans environ. On doit souligner que ces valeurs se rapportent à des remblais.

### 1.1.3. Aléa statistique

On peut après avoir fait l'ajustement à la loi de Gumbel calculer l'aléa statistique de l'ajustement des températures minimales, à différentes profondeurs dans le sol à la station de Paris - Montsouris sur la période 1879-1981 selon la méthode présentée au chapitre 3, paragraphe 2.3, en utilisant les abaques de Bernier. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 4.3.

Dans le tableau 4.3, on remarque que les intervalles de température sont plus grands à 60 cm qu'à 30 cm et 1 m car il y a moins de valeurs dans la série de donnée : 61 au lieu de 81. L'intervalle de confiance à 70 % est toujours inclus dans celui à 95 %, car on prend moins de risque dans l'affirmation. Plus la durée de retour est grande, plus l'intervalle de température est grand car l'aléa statistique est plus grand. Enfin, on note que l'intervalle de température est toujours dissymétrique autour de la température d'ajustement puisque C1 est supérieur à C2 : le risque statistique est plus grand pour les températures les plus basses.

On notera, pour mémoire, la température minimale à 1 m de profondeur de période de retour millennale, voisine de - 1 °C. Ceci confortera les résultats de la suite de l'étude.

### 1.1.4. Conclusions et remarques

L'intérêt de cette méthode est qu'elle est relativement simple à utiliser. De plus les résultats numériques sont très précis. Toutefois, elle nécessite les données de température sous la surface du sol sur une assez longue période. De plus les conclusions ne sont applicables qu'au sol de la station météorologique ou à un sol de conductibilité thermique voisine. Or nous verrons que la conductivité thermique des sols est très variée et qu'elle est aussi variable dans le temps. Ceci est donc un inconvénient majeur pour cette méthode.

**Tableau 4.3 : Intervalles de confiance des températures millénales, centennales et décennales en °C à différentes profondeurs à Paris - Montsouris**

profondeur	température moyenne de la série	écart type de la série	température millénaire d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 95 %		température centennale d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 95 %		température décennale d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 95 %		nombre de valeur de la série
				borne inférieure	borne supérieure		borne inférieure	borne supérieure		borne inférieure	borne supérieure	
à 30 cm	0.9	1.4	-6.8	-9.0	-5.1	-4.0	-5.5	-2.9	-1.1	-2.0	-0.5	81
à 60 cm	2.5	1.1	-3.5	-5.5	-2.0	-1.3	-2.7	-0.3	0.9	0.0	1.4	61
à 1 m	4.4	1.0	-1.1	-2.7	0.0	0.8	-0.2	1.6	2.9	2.2	3.3	81

profondeur	température moyenne de la série	écart type de la série	température millénaire d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 70 %		température centennale d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 70 %		température décennale d'après l'ajustement	intervalle de confiance à 70 %		nombre de valeur de la série
				borne inférieure	borne supérieure		borne inférieure	borne supérieure		borne inférieure	borne supérieure	
à 30 cm	0.9	1.4	-6.8	-7.8	-6.0	-4.0	-4.6	-3.4	-1.1	-1.5	-0.8	81
à 60 cm	2.5	1.1	-3.5	-4.4	-2.7	-1.3	-1.9	-0.8	0.9	0.5	1.1	61
à 1 m	4.4	1.0	-1.1	-1.9	-0.5	0.8	0.3	1.2	2.9	2.6	3.1	81

C1 à 95 %		à 30 cm	à 60 cm	à 1 m
1/1000	1.53	1.80	1.53	
1/100	1.09	1.26	1.09	
1/10	0.62	0.75	0.62	

C1 à 70 %		à 30 cm	à 60 cm	à 1 m
1/1000	0.70	0.81	0.70	
1/100	0.48	0.55	0.48	
1/10	0.26	0.30	0.26	

C2 à 95 %		à 30 cm	à 60 cm	à 1 m
1/1000	1.20	1.35	1.20	
1/100	0.80	0.91	0.80	
1/10	0.41	0.49	0.41	

C2 à 70 %		à 30 cm	à 60 cm	à 1 m
1/1000	0.60	0.67	0.60	
1/100	0.40	0.46	0.40	
1/10	0.20	0.22	0.20	

## 2. Définition et calcul de l'indice de gel

Pour apprécier la profondeur de gel, les ingénieurs en technique routière ont préféré une méthode plus complexe mais aussi plus facilement transposable. Elle utilise la notion d'indice de gel.

### 2.1. Définition de l'indice de gel

Pour déterminer la rigueur d'une période de gel, on fait appel à l'indice de gel qui prend en compte la durée de la période de gel et les valeurs des températures négatives. En effet l'indice de gel est l'intégrale changée de signe de la température par rapport au temps, prise entre l'instant où la température devient négative et celui où elle redevient positive.

### 2.2. Calcul de l'indice de gel

Pratiquement, l'indice de gel (exprimé en °C x jours) apparaît sur un diagramme des températures moyennes journalières cumulées en fonction du temps comme la différence d'ordonnées entre le maximum (début du gel) et le minimum (fin du gel - début du dégel) de la courbe obtenue. Un exemple est donné ci-dessous, il concerne la station de Langres au cours de l'hiver assez rigoureux de 1984-85.

La figure 4.2 présente la température moyenne quotidienne à la station de Langres pour le mois de décembre 1984 et les mois de janvier et février 1985. On notera que la température moyenne météorologique est en fait la demi-somme des températures maximale et minimale quotidienne. On remarque sur cette courbe 2 périodes de gelée pour lesquelles la température moyenne est négative. La figure 4.3 qui présente les températures cumulées, nous permet de calculer les indices de gel de ces 2 périodes.

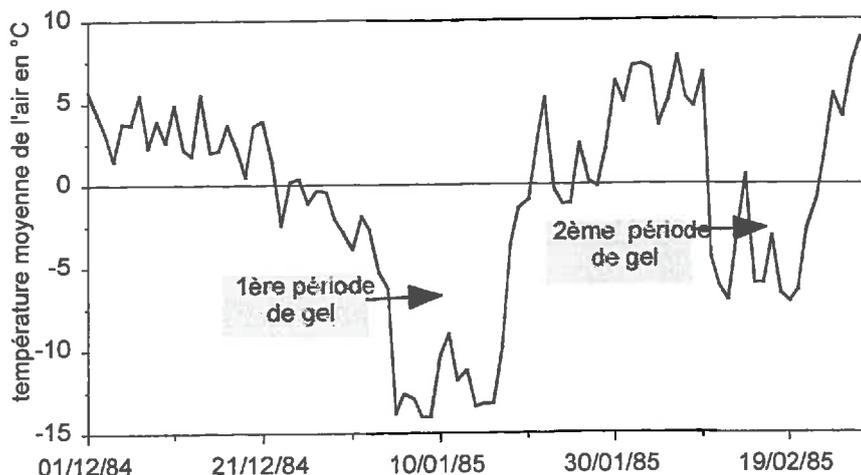
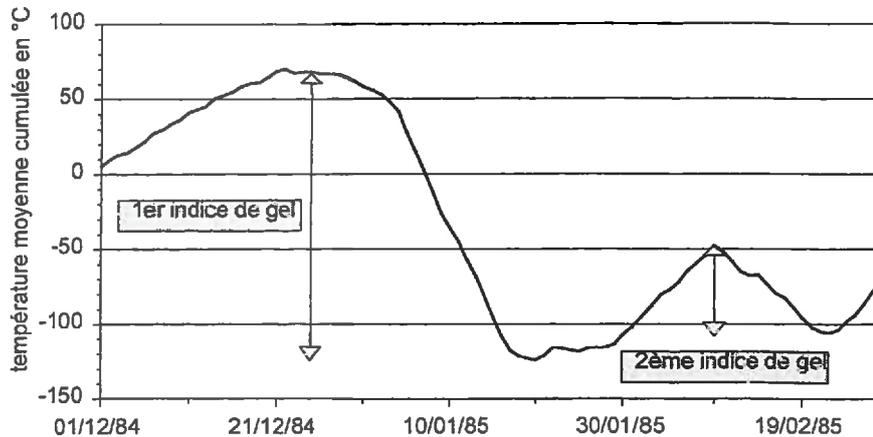


Figure 4. 2 : Température moyenne quotidienne à Langres au cours de l'hiver 1984/85

Les deux périodes de gel visualisées sur la courbe des températures moyennes quotidiennes de l'air ont les indices respectifs suivants :

$$67 - (-123) = 190,8 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$$

$$-47,4 - (-105,9) = 58,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$$



**Figure 4. 3 : Température quotidienne cumulée à Langres au cours de l'hiver 1984/85**

Nous remarquons que pour la 2<sup>ème</sup> période de gel (du 10/02/1985 au 22/02/1985), la température est redevenue positive pendant une journée (le 14/02/1985). Toutefois nous n'avons pas tenu compte de ce bref réchauffement dans le calcul de l'indice de gel de la période. En effet on peut affirmer que, du point de vue thermique, le sol n'ayant pas eu le temps de se dégeler, cette période est continue.

Cela peut également être le cas pour des intermèdes chauds de quelques jours. Dans ce cas, il n'y aurait pas lieu, du seul point de vue thermique, d'associer les deux périodes de gel, le sol ayant le temps de se dégeler. Pourtant du point de vue des effets au sol, le problème est plus délicat car même si le sol est dégelé, l'eau de fusion des lentilles n'a pas toujours le temps de s'évacuer et dans ce cas, la seconde phase de gel aura des effets sur le sol d'autant plus importants.

### 3. Indices de gel des hivers prévisibles

Selon le même principe que celui appliqué aux précipitations, il s'agit d'évaluer l'indice de gel des hivers statistiquement prévisibles : centennal ou millennial, à partir de données météorologiques recueillies sur des périodes beaucoup plus courtes.

#### 3.1. Données historiques

Les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont calculé les indices de gel français depuis 1951 pour un très grand nombre de stations météorologiques. Auparavant (depuis 1900 environ) un bon nombre de stations relevaient la température de l'air minimale et maximale. Enfin les chroniques historiques, nous rappellent surtout par le biais de leurs terribles effets, les hivers rigoureux depuis « l'an mil » (cf. annexe n°2).

### 3.2. Ajustement statistique et extrapolation

Nous avons vérifié l'ajustement à la loi log-normale des indices maximaux annuels avec la station de Clermont Ferrand pour laquelle nous disposons de la série 1875-1991 soit 104 valeurs non nulles (cf. figures 4.4 d et 4.4 e). Pour cette station, l'ensemble des indices de gel (en °C.j) s'ajuste assez bien à la loi log-log-normale.

Afin d'appliquer ces calculs aux sites de stockage situés dans l'Est de la France, nous avons choisi 3 stations météorologiques représentatives : Langres, St. Dizier et Reims. Pour chacune de ces stations nous avons étudié l'ajustement statistique des indices de gel maximaux annuels, et de tous les indices de gel de la période 1950-1990. Les indices de gel maximaux annuels (en °C.j) de chaque station s'ajustent assez bien à la loi log-normale (cf. figures 4.4 a, b, c).

Nous en déduisons donc l'indice de gel des périodes de gelée dites millennales, centennales et décennales pour les quatre stations considérées.

**Tableau 4. 4 : Synthèse des ajustements statistiques pour les 4 stations**

Stations \ période de retour	1000 ans	100 ans	10 ans
Langres	835 °C.j	439°C.j	184°C.j
St. Dizier	811°C.j	344°C.j	107°C.j
Reims	892°C.j	394°C.j	130°C.j
Clermont Ferrand	606°C.j	304°C.j	119°C.j

Si on s'intéresse à la valeur de période de retour 1000 ans, les 835 °C.J pour la station de Langres équivalent par exemple à 80 jours (soit 2,5 mois) de gelée à -10°C. Cela semble s'être déjà produit historiquement puisque les chroniques, citées en annexe 2, nous décrivent l'hiver 1570-1571 ainsi : "*l'hiver fut si rude de la fin novembre à la fin février que pendant 3 mois les rivières restèrent suffisamment gelées pour supporter tous les chariots; le 10 mars la Meuse et le Rhin étaient encore gelés*".

## 4. Calcul des épaisseurs de gel

### 4.1. Rappels théoriques sur les échanges de chaleur

Les transferts de chaleur peuvent se faire par rayonnement, conduction et convection. Dans la nature, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois modes de transfert qui se concurrencent. Lorsque l'un des modes est prédominant, on négligera les 2 autres. Dans l'étude des profondeurs de gel, nous nous plaçons dans des périodes froides : températures voisines de 0 °C et sur la frange supérieure de sol (quelques mètres). Dans ces conditions on peut admettre que le phénomène de conduction prédomine, et c'est donc le seul mode de transfert pris en compte dans le modèle numérique utilisé. De ce fait nous ne présenterons que le phénomène de conduction. Du point de vue thermique et dans ces conditions, un matériau peut être caractérisé par 2 grandeurs : sa conductibilité thermique et sa capacité calorifique. La chaleur latente de congélation de l'eau est aussi un paramètre important.

### 4.1.1. Conductibilité thermique

La conductibilité thermique  $\lambda$  est d'autant plus grande que la chaleur, ou le froid, se propage plus vite dans le matériau. La conductibilité s'exprime généralement en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . On notera que pour convertir des  $kcal.h^{-1}.m^{-1}.K^{-1}$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ , il faut multiplier par 1,16.

En règle générale, les matériaux naturels sont d'autant plus conducteurs que leur teneur en gaz est plus faible, et donc que leur densité est élevée, et que leur teneur en eau est plus forte.

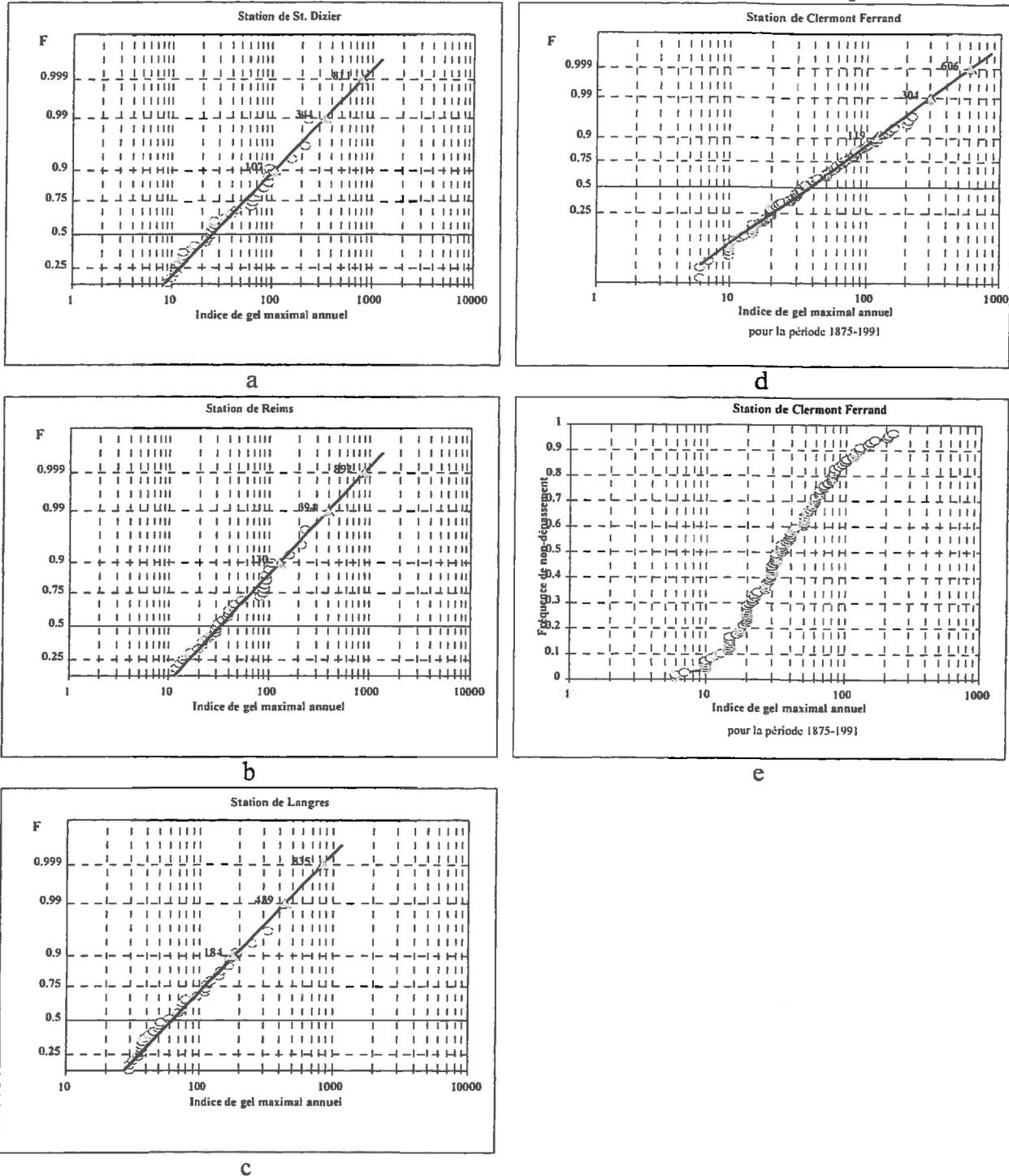


Figure 4. 4 : Ajustement des indices de gel de 3 stations et vérification des ajustements pour Clermont Ferrand

Voici quelques valeurs comparatives tirées de la bibliographie qui corroborent cette loi générale.

$\lambda_{\text{eau}}$  à 30°C est de 0,63 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\lambda_{\text{air}}$  à 30°C est de 0,02 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\lambda_{\text{argile}}$  de masse volumique 1,5 kg.m<sup>-3</sup> à 23°C est de 1,25 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\lambda_{\text{sable}}$  contenant 10 % d'humidité, de masse volumique 1,6 kg.m<sup>-3</sup> à 20°C est de 0,93 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

Kersten a établi des abaques (cf. figure 4.5) qui donnent la conductibilité thermique des matériaux naturels (en calorie / seconde . centimètre . degré °C) en fonction de leur densité sèche (en gramme / centimètre cube) et de leur teneur en eau (en % du poids sec).

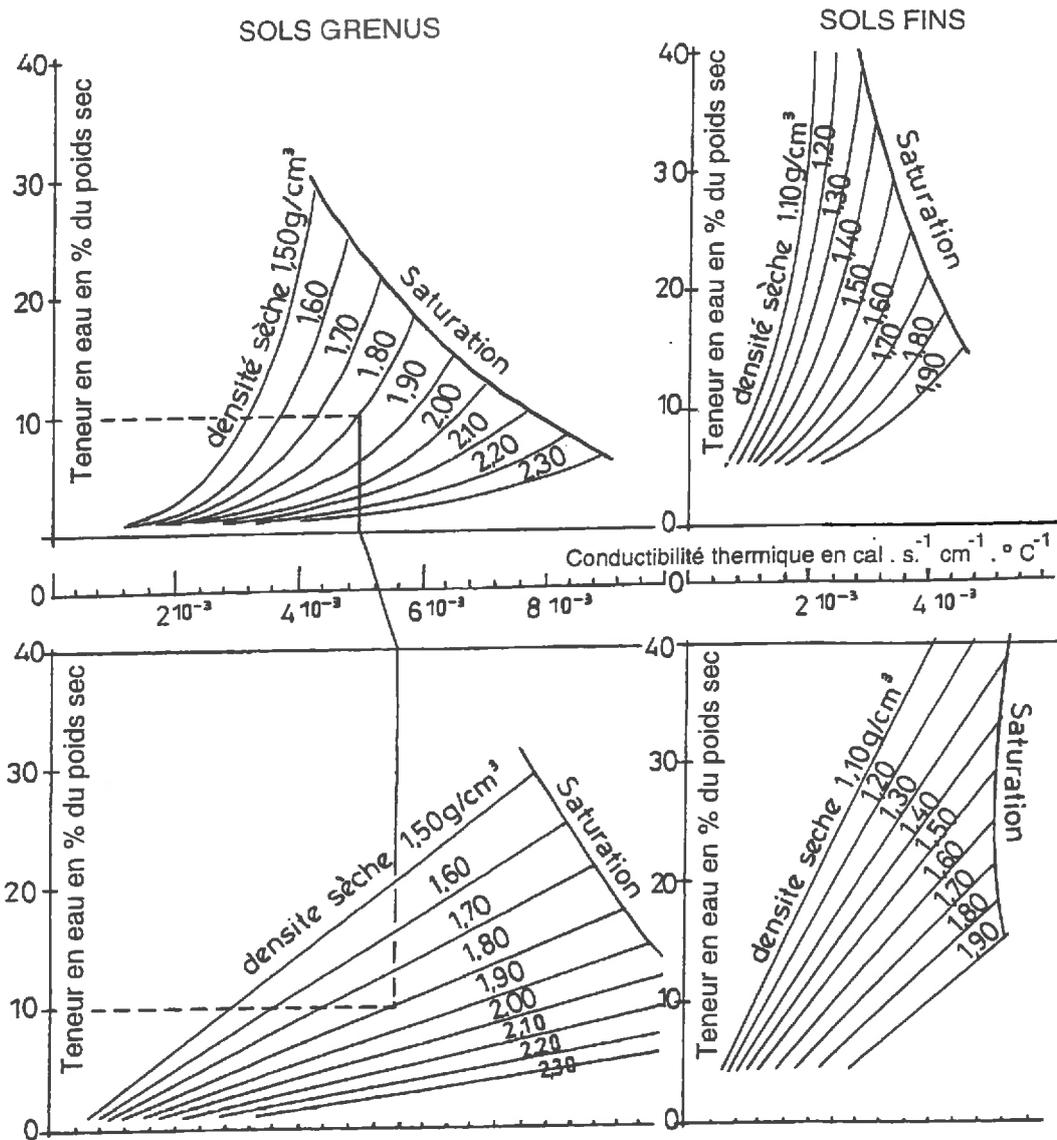


Figure 4. 5 : Coefficient de conductibilité thermique d'après les formules de Kersten

#### 4.1.2. Capacité calorifique

La capacité calorifique,  $C_p$ , mesure la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier d'un degré la température moyenne du matériau. Elle est d'autant plus grande, toutes choses égales par ailleurs, que la teneur en eau du matériau est plus élevée.

$$C_{p_{\text{eau}}} = 4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$C_{p_{\text{air}}} = 1.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \text{ mais densité très faible}$$

$$C_{p_{\text{gravesec}}} = 0,836.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$C_{p_{\text{solfinsec}}} = 0,71.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

#### 4.1.3. Chaleur latente de congélation

La chaleur latente de congélation,  $L$ , mesure le nombre de frigories nécessaires à la congélation de l'eau contenue dans l'unité de volume ou de masse du matériau. Elle est d'autant plus grande dans les matériaux naturels, toutes choses égales par ailleurs, que la teneur en eau est plus élevée, car, dans ces matériaux, le seul composé qui change d'état est l'eau.

$$\text{Chaleur latente de congélation de l'eau, } L_{\text{eau}} = 334.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$$

#### 4.1.4. Transfert de chaleur par conduction

Dans les solides le phénomène de conduction est souvent prédominant. La propagation de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps se fait suivant 2 mécanismes : une transmission par vibration des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. L'importance relative de ces 2 mécanismes dépend évidemment de la nature du corps.

La loi de transmission de la chaleur par conduction est, avec certaines hypothèses (solide homogène et isotrope, régime permanent), la loi de Fourier. S'il y a conservation de l'énergie, on peut écrire :

$$\rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \Delta \theta = 0$$

avec :  $\rho$  la masse volumique et  $\theta$  la température

#### 4.1.5. Conclusions pratiques

On entrevoit ainsi trois procédés qui permettent de lutter thermiquement contre le gel :

- par une couverture adéquate de tout venant faire en sorte que le niveau sensible soit hors d'atteinte de la pénétration du gel ;
- réaliser un écran thermique par une couche de capacité calorifique et de chaleur latente de congélation très fortes, dont le refroidissement et la congélation consomment une quantité importante de frigories : une couche d'écorces gorgée d'eau, par exemple ;
- réaliser une barrière isolante à l'aide d'un matériaux à faible conductibilité thermique comme le polystyrène expansé.

## 4.2. Présentation du logiciel GELSOL

Le logiciel GELSOL a été mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Il comporte 3 modules : un module purement thermique GEL2D, un module incluant les phénomènes hydriques HYDRE, et un dernier module MECA qui inclut les contraintes mécaniques générées par les transferts hydriques. Nous n'avons utilisé que le module thermique. On a pu ainsi visualiser la profondeur maximale de gel. On aurait pu étudier les effets du gel sur la circulation de l'eau ainsi que la déformation des matériaux grâce aux modules HYDRE et MECA.

Le logiciel GELSOL utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations des échanges thermiques.

Il ne tient compte que de la conduction thermique. C'est un modèle bi-dimensionnel. Toutefois les équations prises en compte sur la verticale sont :

$$\rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad \text{dans la partie gelée ou non gelée}$$

et

$$\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - \lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = L \frac{ds}{dt} \quad \text{sur le front de gel}$$

(l'indice 2 est assigné à la partie gelée supérieure, l'indice 1 est assigné à la partie non gelée inférieure et  $s(t)$  est la profondeur de gel à l'instant  $t$ )

### 4.2.1. Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle GELSOL sont :

- la géométrie de la structure ;
- les caractéristiques de chaque couche de sol (densité, teneur en eau, conductivité thermique à l'état gelé et non gelé, capacité calorifique ; toutefois si l'on ne précise pas la capacité calorifique, le logiciel impose une capacité calorifique à l'état sec de  $836 \text{ J. kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  soit  $0,19 \text{ kcal. kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et calcule la capacité calorifique réelle en fonction de la teneur en eau) ;
- les conditions aux limites, par exemple :
  - ⇒ en surface : condition d'échange (Fourier) - la température de l'air en surface et le coefficient alpha (qui permet de déduire de la température de l'air, la température du sol) ;
  - ⇒ à la base : condition de flux (Neuman) - le flux thermique terrestre du lieu ;
  - ⇒ sur les cotés : condition de flux (Neuman) - flux nul ;
- des paramètres du maillage, d'impression des résultats et courbes diverses.

## 4.3. Application

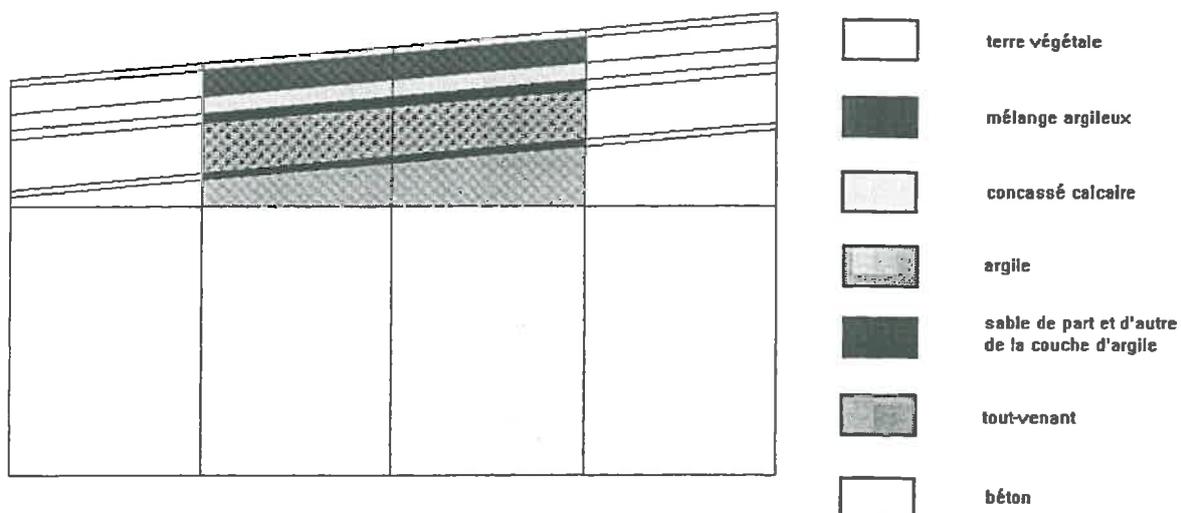
Cette étude, a pour objectif, l'évaluation des conséquences géotechniques du gel (lentilles de glace, cryoturbation, modification des argiles compactées avec augmentation de leur perméabilité...) sur la stabilité de la couverture d'un stockage en surface de longue durée (plusieurs centaines d'années par exemple). Dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte le risque millennial de gel. Pour ce faire une modélisation est réalisée. Les différentes étapes de la modélisation sont :

- Calcul de l'indice de gel de chaque période froide pour les stations météorologiques les plus proches, (cf. paragraphe 2.2).
- Ajustement selon la répartition log-normale des indices maximaux annuels et estimation par extrapolation de l'indice de gel de période de retour 1000 ans, (cf. paragraphe 3.2).
- Réalisation du maillage de la structure multicouche inclinée et application à cette structure d'un scénario de température ayant cet indice de gel, avec le logiciel GELSOL mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, (cf. paragraphe 4.3).
- Enfin lecture et analyse des résultats numériques ou graphiques comme le profil vertical de température. D'autres résultats sont également disponibles : profondeur de gel, isothermes, ...

#### 4.3.1. Géométrie de la couverture et maillage

Nous avons modélisé la structure d'une des couvertures proposées par l'ANDRA pour le Centre de stockage de l'Aube (version argile seule).

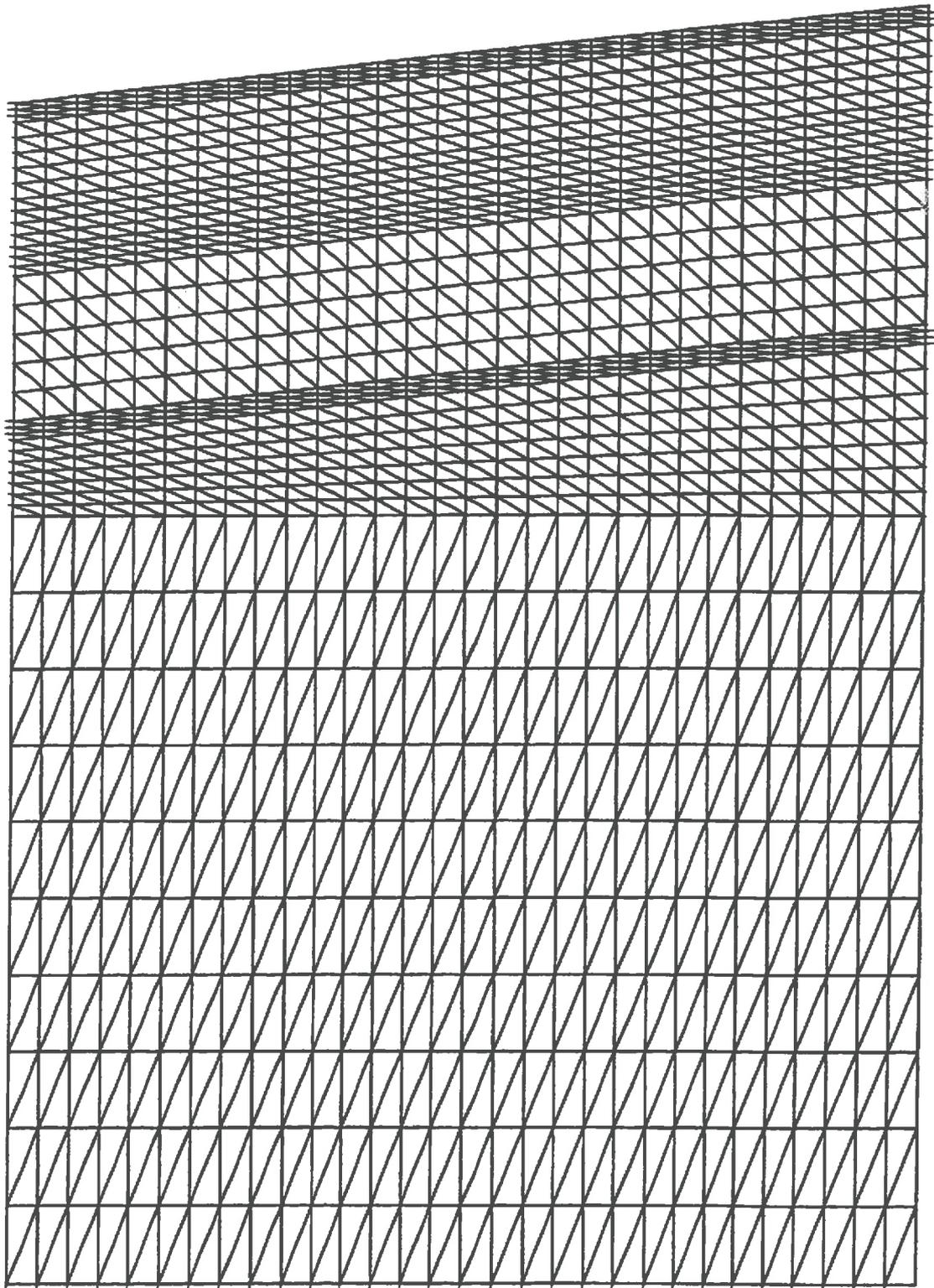
Afin de limiter le temps de calcul, on a choisi de ne modéliser que la partie centrale d'un pan de la couverture. Nous avons vérifié que cela n'avait pas d'influence sur les résultats des calculs au niveau du profil médian. En effet, nous avons obtenu les mêmes résultats sur ce profil alors que les talus modélisés étaient différents. Ainsi, pour les calculs principaux, le talus modélisé, en grisé sur la figure 4.6, est un trapèze de 12,5 m de base et de 12,8 m de hauteur.



**Figure 4. 6 : Géométrie de la couverture modélisée**

L'utilisation d'un logiciel de maillage externe (MAX2D pré-processeur de CESAR) nous a permis de modéliser de façon plus précise la géométrie réelle de la couverture en pente. On obtient avec ce logiciel un maillage quadrilatère. Nous avons donc obtenu le maillage triangulaire nécessaire au logiciel GEL2D en découpant en 2 les quadrilatères du maillage créé avec CESAR.

Le maillage (cf. figure4.7) est plus serré sur les couches les plus fines afin de bien prendre en compte leurs caractéristiques thermiques. Le maillage est également plus serré sur la partie superficielle de la couverture car la température varie de façon plus importante. L'intérêt de ce volume maillé est de répondre aux 4 contraintes suivantes : maillage triangulaire, régularité du maillage, finesse du maillage, temps de calcul réduit. L'optimisation de ces différents paramètres a nécessité un assez grand nombre de calculs.



**Figure 4. 7 : Maillage de la structure multicouche**

On notera que la représentation du maillage sur la figure 4.7 est déformée puisque la base de ce trapèze mesure en réalité 12,5 m et sa hauteur 12,8 m.

### 4.3.2. Conditions aux limites

#### Limite supérieure du modèle

Le sommet de cette structure a été soumis à une période de gel dont l'indice de gel a été calculé comme étant l'indice extrême de période de retour millennale. Cet indice correspond à une multitude de scénarios (évolution de la température de surface) dont 2 ont été choisis. Un scénario "court" avec une température très basse (6 semaines pendant lesquelles la température moyenne de l'air est  $-20^{\circ}\text{C}$ ), un plus "long" avec une température moyennement basse (3 mois à la température moyenne de  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Ces 2 scénarios ont été complétés par ceux d'un gel centennal et d'un gel décennal sur une période continue à  $-10^{\circ}\text{C}$ . Les courbes de température de l'air imposées au sommet du modèle sont regroupées sur la figure 4.8.

Enfin plusieurs valeurs ont été attribuées au coefficient alpha car celui-ci est difficile à estimer. En effet sa valeur dépend par exemple du vent et des turbulences à la surface ou de la couche neigeuse. C'est en fait l'expérience des utilisateurs du logiciel qui nous a permis de choisir ce coefficient. Dans les calculs présentés ici, nous avons affecté au coefficient alpha (coefficient de transmission de la chaleur entre la température de surface à 1,5 m au dessus du sol et la terre végétale) la valeur 6, par expérience.

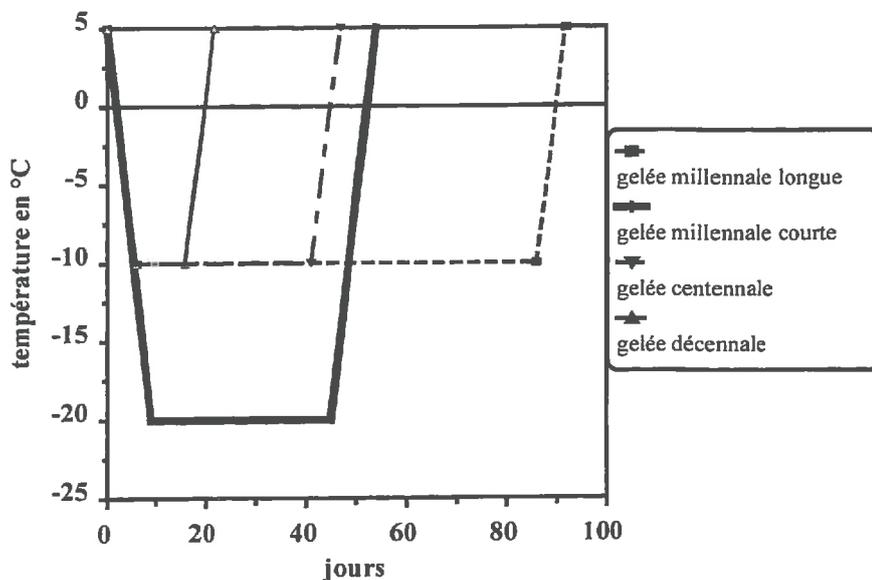


Figure 4. 8 : Différents scénarios de température de l'air

#### Limite inférieure du modèle

La valeur attribuée au flux thermique terrestre, égale à  $60 \text{ mW.m}^{-2}$ , est issue de la carte "Heat flow density distribution in the european community" au 1/5 000 000 (Haenel, R., et al, 1980, "Atlas of subsurface temperatures in the European Community", *Commission des Communautés Européennes, 43 cartes*). Cette valeur est assez faible du point de vue de l'énergie reçue par le système mais son effet n'est pas totalement négligeable.

Il faut noter que le flux de chaleur dégagé par les colis de déchets n'est pas pris en compte par manque d'information. Ce dernier point est moins gênant car il va dans le sens de la sécurité.

### Limites latérales du modèle

Sur les 2 cotés du modèle nous avons choisi d'imposer un flux nul. On notera que ces limites ne sont pas les bords d'un pan de la couverture mais des profils théoriques à l'intérieur du pan. Ceci est nécessaire pour limiter le temps de calcul du logiciel. Toutefois nous avons vérifié avant de choisir cette géométrie réduite que sur le profil médian les résultats étaient inchangés, toutes choses égales par ailleurs.

### 4.3.3. Caractéristiques thermiques des différents matériaux

Plusieurs valeurs ont été attribuées aux paramètres difficiles à évaluer avec exactitude : la teneur en eau des terrains en place et donc les conductivités des terrains.

Les valeurs de conductivité sont issues de la bibliographie, essentiellement "Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et leurs mélanges" d'André Missenard, (Eyrolles 1965), "Mise hors gel des plates-formes ferroviaires" *document interne L.C.P.C.* ou encore issues des abaques de Kersten.

Voici un exemple des valeurs attribuées aux matériaux.

**Tableau 4. 5 : Exemple des caractéristiques physiques et thermiques des matériaux de la couverture**

matériaux	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.K^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.K^{-1}$	masse spécifique sèche en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	2,3	2,8	2012	9,6
concassé calcaire	0,7	0,8	1240	5,0
sable	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,7	1,9	1923	12
sable	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	2,3	2,8	2012	9,6
béton	1,4	1,4	2250	10

Les conductivités du mélange argileux et du tout-venant (sols non saturés) sont issues du tableau "sols moyens", celles du sable font parties du tableau "sols grenus", celles de l'argile viennent du tableau "sols fins". Ces tableaux sont regroupés en annexe 5.

La conductivité de la terre végétale est celle du mélange argileux légèrement diminuée du fait de la plus forte teneur en matière organique, nous avons peut être surévalué sa masse spécifique.

La conductivité du béton non gelé est issue de la bibliographie : béton armé humide.

La conductivité du concassé est copiée sur celle du ballast de chemin de fer et légèrement diminuée du fait de sa composition calcaire.

### 4.3.4. Calculs

Une vingtaine de simulations de gel ont été réalisées avec le logiciel GELSOL. Une dizaine de calculs ont été nécessaires pour vérifier la bonne marche du logiciel, ses différentes options

(notamment la prise en compte des flux de chaleur aux frontières), les effets du maillage, le temps de calcul.

Chaque essai a fait l'objet d'une fiche selon le modèle présenté au paragraphe 4.3.6 ci-après qui reprend les données d'entrée et les principaux résultats. L'ensemble des fiches est donné en annexe 4. Toutefois afin de visualiser l'ensemble des essais et la logique de la démarche de validation du calcul, le tableau 4.6 présente les principales données d'entrée des calculs.

**Tableau 4.6 : Données d'entrée de l'ensemble des calculs**

n° du calcul	géométrie du modèle	maillage	matériaux	conditions aux limites
001	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 216 noeuds	humides	scénario millennial long température de l'air 304 pas de temps
002	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 728 noeuds	humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
003	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 1288 noeuds	peu humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
004	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 1288 noeuds	moyennement humides	scénario millennial long température du sol 448 pas de temps
005	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 1288 noeuds	peu humides	scénario millennial court température de l'air 540 pas de temps
006	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 1288 noeuds	très peu humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
010	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 728 noeuds	humides	scénario millennial long température de l'air flux terrestre 5 W/m <sup>2</sup> 448 pas de temps
011	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL 1288 noeuds	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
101	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur GELSOL utilisé en externe 728 noeuds	humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
102	modèle complet rectangulaire 6 couches	mailleur MAX2D maillage irrégulier	humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
103	modèle complet trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage irrégulier	humides	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
104	modèle complet trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage irrégulier	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
104b	modèle complet trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage irrégulier	assez sec	scénario millennial long température de l'air 668 pas de temps

n° du calcul	géométrie du modèle	maillage	matériaux	conditions aux limites
105	modèle complet trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage régulier 1938 noeuds	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
106	demi-modèle trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage régulier 1271 noeuds	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
107	demi-modèle trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage régulier 1271 noeuds	assez sec	scénario centennial température de l'air 448 pas de temps
108	demi-modèle trapézoïdal 8 couches	mailleur MAX2D maillage régulier 1271 noeuds	assez sec	scénario décennial température de l'air 448 pas de temps
109	demi-modèle trapézoïdal 8 couches profil aval	mailleur MAX2D maillage régulier 1271 noeuds	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps
110	demi-modèle trapézoïdal 8 couches profil amont	mailleur MAX2D maillage régulier 1271 noeuds	assez sec	scénario millennial long température de l'air 448 pas de temps

#### 4.3.5. Résultats de validation et d'optimisation

Chaque série d'essais nous a permis de tirer quelques conclusions.

##### Essais 001 à 110

Nous avons vérifié que la profondeur de gel résultant des simulations était en accord avec les données bibliographiques. D'après Rouquès (1975), dans un massif *homogène non gélif*, la profondeur de gel est proportionnelle à la racine carrée de l'indice de gel de surface. Si on exprime l'indice de gel en degré centigrade x jours et la profondeur de gel en centimètres, on a la relation :

$$\text{profondeur de gel en cm} = B \times \text{racine carrée (indice de gel en degré jour)}$$

où le coefficient de proportionnalité (B) prend la valeur moyenne de 5, mais peut varier entre 3 et 10 en fonction des caractéristiques thermiques du massif et de sa teneur en eau. Dans *un milieu constitué de plusieurs couches*, la vitesse de pénétration du gel est différente dans chaque couche en fonction de leurs propriétés thermiques, de leur teneur en eau et des possibilités d'aspiration de l'eau dans les couches gélives. On peut cependant montrer que dans une couche donnée, la profondeur de gel varie linéairement en fonction de l'indice de gel à la surface. Pour l'ensemble de la structure, la profondeur de gel est donc reliée à la racine carrée de l'indice de gel par l'intermédiaire d'une courbe composée de segments de droite. En pratique, compte tenu des nombreux paramètres qui entrent en jeu, il reste néanmoins difficile de prévoir avec précision la forme de la courbe.

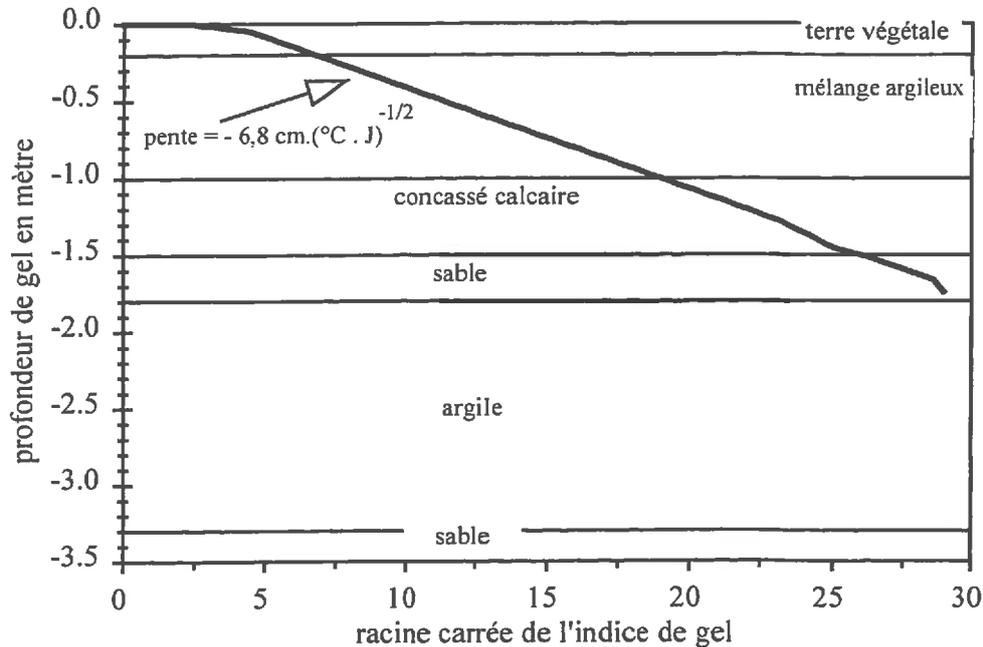
Dans nos calculs, la séquence de gel imposée au terrain a pour indice :

$$80 \text{ j} \times 10^\circ\text{C} + 4 \text{ j} \times 10^\circ\text{C} = 840 \text{ }^\circ\text{C.j} = (28,9)^2$$

profondeur de gel minimale obtenue :  $94 \text{ cm} = B \times 28,9$   
 profondeur de gel maximale obtenue :  $174 \text{ cm} = B \times 28,9$   
 donc :  $3,25 < B < 6,02$

D'après la bibliographie B varie entre 3 et 10 donc ces résultats sont cohérents. De plus on peut observer sur la figure 4.9 la linéarité par morceau de la relation pour l'essai 106.

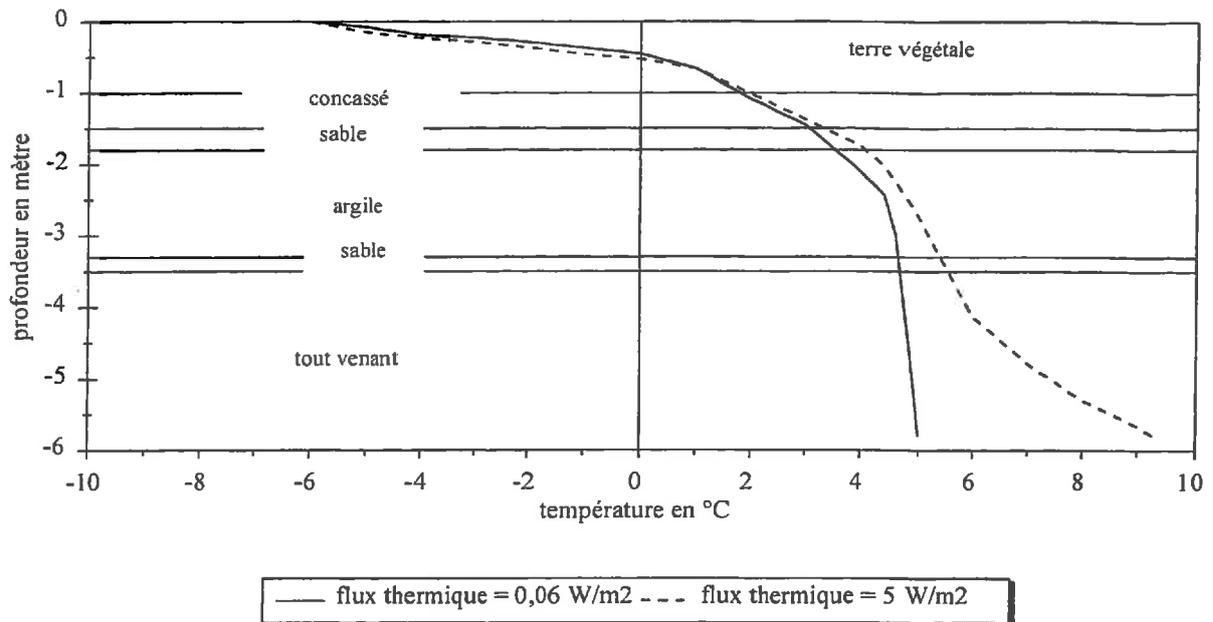
### Essai 106



**Figure 4. 9 : Profondeur de gel en fonction de la racine carrée de l'indice de gel de la modélisation millennale sèche**

### Essais 002 et 010

En portant le flux thermique terrestre à  $5 \text{ W.m}^{-2}$  au lieu de  $0,06 \text{ W.m}^{-2}$ , nous avons vérifié qu'il était effectivement pris en compte dans les calculs. En effet, si on compare les calculs 002 et 010, toutes les données sont identiques à l'exception du flux terrestre. Cette modification n'affecte pas l'épaisseur de sol gelée (0,94 m) mais les profils de température sont différents (cf. figure 4.10). La température à la base du modèle passe par exemple de 5 à  $9,5 \text{ °C}$ .



**Figure 4. 10 : Profil de température dans le sol le 30<sup>ème</sup> jour des essais 002 et 010 effet du flux terrestre**

#### Essais 011 et 101

Dans l'essai 011 les conditions hydriques sont très sèches puisque les teneurs en eau varient de 5 à 12 % et les conductivités thermiques sont assez élevées. En comparant les calculs 011 et 101 (calculs identiques, seules les teneurs en eau sont différentes) on note que l'épaisseur de sol gelé est de 1,74 m au lieu de 0,94 m. On constate déjà que la teneur en eau est déterminante.

#### Essais 002,101 et 102

Les différentes parties du logiciel étant maintenant validées, nous avons modifié la géométrie du talus grâce à l'utilisation d'un logiciel de maillage intermédiaire : MAX2D le pré-processeur du logiciel CESAR. Nous avons vérifié par 3 simulations que les résultats des calculs de front de gel étaient insensibles au fait de changer de mailleur.

#### Essais 103, 104, 104b et 105

On modélise effectivement un talus en pente soit en utilisant le maillage triangulaire de CESAR, soit en divisant en 2 les rectangles créés par le maillage quadrilatère de CESAR. Dans ce dernier cas les calculs peuvent être très longs car on a un grand nombre de nœuds : le calcul de l'essai 105 a duré 8 heures. Mais cette configuration semble nécessaire. La régularité des profils de température l'atteste.

### Essais 106, 107 et 108

On ne modélise que la partie centrale du massif pour réduire le temps de calcul. Le maillage est obtenu en divisant les quadrilatères de CESAR. Nous pensons que l'optimisation du temps de calcul, du maillage et de la précision des résultats est achevée.

Les résultats complets de l'essai n°106 indice de gel millennial, scénario long sont donnés au paragraphe 4.3.6.

### Essais 109 et 110

Le logiciel ne donne les résultats que sur un profil choisi en entrée. Pour tester l'effet de la pente des terrains, on est obligé de réaliser 2 calculs. L'essai 109 nous donne les résultats sur le profil aval, et l'essai 110 sur le profil amont. On étudie les différences entre chaque coté du massif, avec un profil à l'amont et un à l'aval du profil médian, les résultats de ces 2 essais sont quasi-identiques.

#### 4.3.6. Résultats de la modélisation millennale

La fiche correspondant à l'essai 106 (cf. figure 4.11) présente les différentes rubriques notées après chaque essai, de plus elle correspond à la modélisation de gel millennial sur terrains plutôt secs.

Les résultats de la modélisation millennale sont pour la plupart issus de l'essai 106 mais des conclusions ont été tirées de tous les autres calculs. De plus une partie des résultats de la modélisation millennale (scénario long) est utilisable pour l'analyse de la modélisation centennale et décennale puisque le scénario de température est identique au départ (la période de gel est plus longue mais avec la même intensité).

Les résultats de la modélisation millennale utilisant le scénario court sont identiques en amplitude à ceux du scénario long. La profondeur de gel maximale est la même et seuls les profils en fonction du temps sont différents car la période est plus courte. On peut par exemple s'en assurer en comparant les essais 003 (scénario long) et 005 (scénario court). Le détail des résultats n'est donc pas reporté ici. Ceci corrobore le principe de base qui énonce que la profondeur de gel est proportionnelle à la racine carrée de l'indice de gel quelque soit le scénario de température. Ce principe validé sur une structure monocouche l'est aussi parfois sur une structure multicouche.

**Figure 4. 11 : Fiche de l'essai 106**

n° de l'essai : 106

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte (partie grisée sur la figure 4.6).

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - CESAR, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds pour 2400 triangles

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en kg/m <sup>3</sup>	w en % du poids sec
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en °C (cf. fig. 4.8)  
 $T_{0\text{jour}} = +5$     $T_{6\text{jours}} = -10$     $T_{86\text{jours}} = -10$     $T_{92\text{jours}} = +5$   
 alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W.m^{-2}$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448 (temps de calcul 1 heure)

**résultats**

**profondeur maximale de gel : 1,74 m**

**dernière couche atteinte par le gel : sable (au dessus de l'argile)**

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 81 jours pour le tout-venant, 52 jours pour le concassé et 18 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,58 °C

type de résultat graphique :

- évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points
- évolution de la température en fonction du temps en 9 points
- évolution de la profondeur de gel en fonction du temps
- profil vertical des températures en 10 instants
- flux thermiques aux limites en 10 instants
- isothermes en 10 instants
- dessin du maillage.

Voici par exemple quelques profils de température obtenus lors de ces simulations.

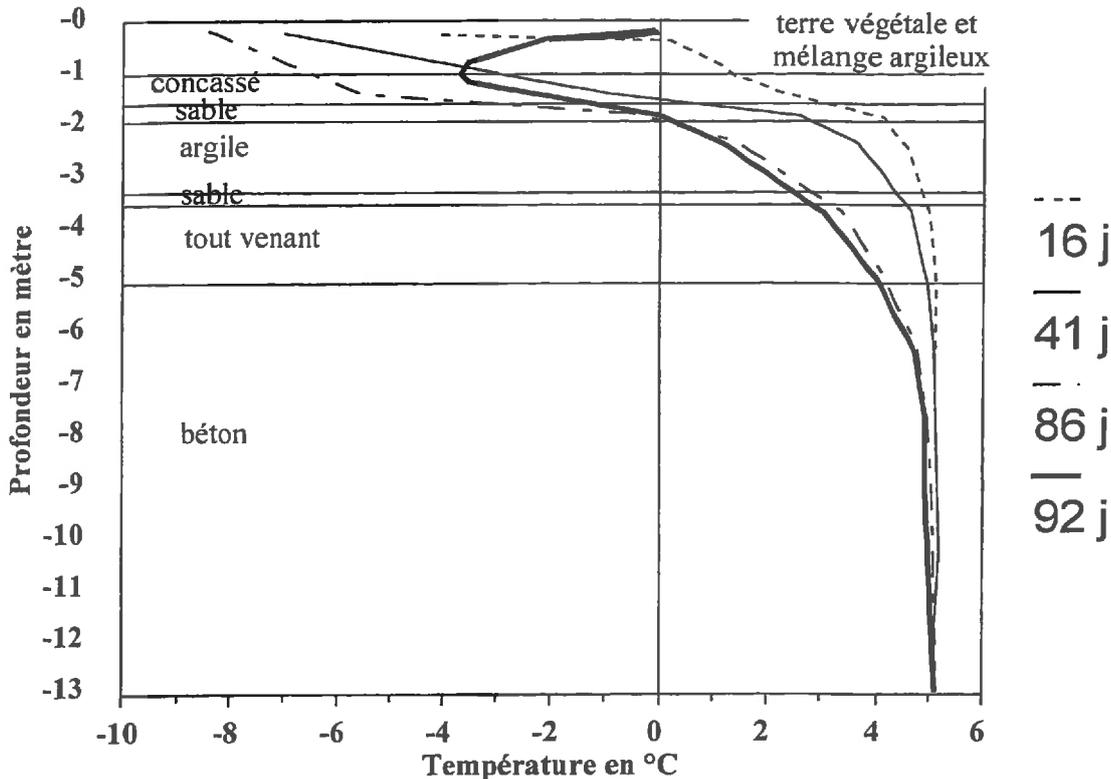


Figure 4. 12 : Profils de température des essais 106, 107 et 108

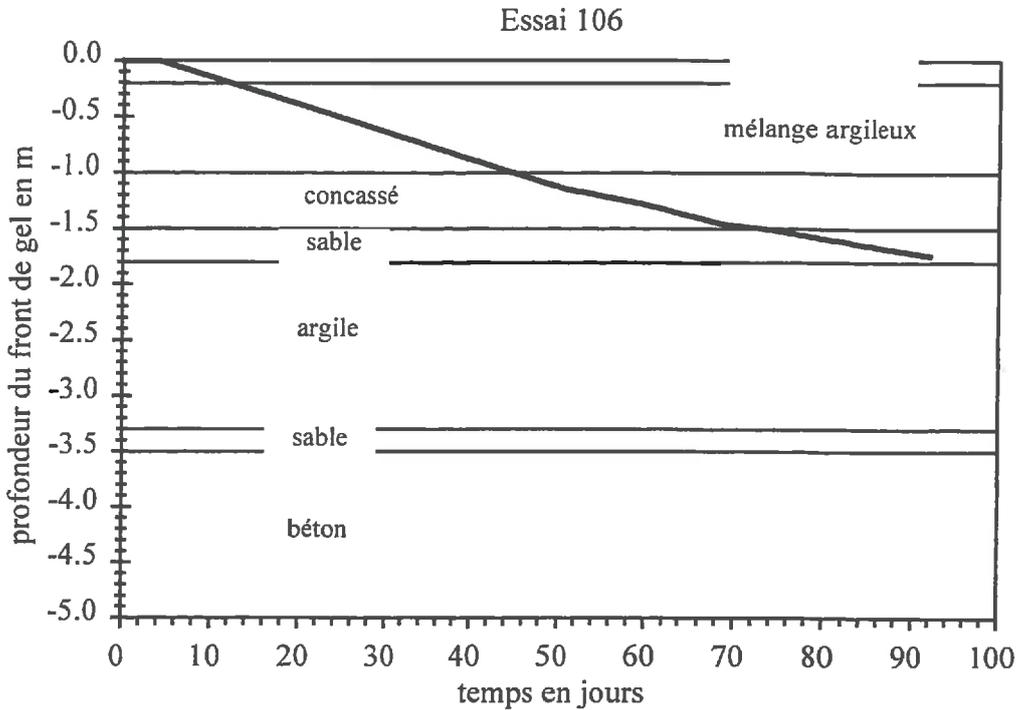
On observe sur les figures 4.12 et 4.13 que les profils de température en fonction du temps ne sont pas réguliers, de même que la progression du gel en profondeur avec le temps alors que la température extérieure est constante. Ceci est dû aux différences du comportement thermique des matériaux. Deux phénomènes se conjuguent ou s'opposent : la valeur de la conductibilité thermique qui influence la vitesse de progression du front de gel de manière proportionnelle et la teneur en eau qui influence cette même vitesse de façon inversement proportionnelle.

Par exemple, les sables qui ont une conductibilité forte et une faible teneur en eau vont « accélérer » la migration du front de gel. La terre végétale avec une conductibilité moyenne et une assez forte teneur en eau retarde la migration du front de gel. Enfin, la faible conductibilité du concassé calcaire et sa faible teneur en eau, retardent la migration du gel à sa base mais l'accélèrent à son sommet. On notera qu'au dégel cette couche aurait également le caractère isolant et donc retarderait le dégel.

Le profil de température dans la structure après 16 jours correspond à l'essai de gel décennal sur terrains secs, celui après 41 jours correspond à l'essai de gel centennal sur terrains secs et ceux à 86 et 92 jours correspondent à l'essai de gel millennial sur terrains secs. Ces profils sont également ceux de la modélisation millennial car la température imposée est égale à -10 °C dans tous les cas. Ils montrent comment le gel progresse en profondeur avec le temps.

L'épaisseur de sol gelé est de 49 cm pour l'essai 108, 1,16 m pour l'essai 107 et 1,74 m pour l'essai 106. Les ruptures de pente sont liées aux différentes conductibilités thermiques. On constate également sur le profil du 92<sup>ème</sup> jour que le dégel progresse depuis la surface alors que le sol en profondeur est encore gelé (cela est aussi le cas pour toutes les fins de période de gel décennal ou centennal).

Figure 4. 13 : Profondeur du front de gel en fonction du temps pour l'essai 106



#### 4.3.7. Analyse des résultats

Les conclusions de ces simulations nous permettent de faire quelques remarques et recommandations.

- Plus les terrains sont humides et moins le gel progresse en profondeur, donc le drainage ne doit pas être trop exagéré. La couche de terre végétale supérieure peut être une bonne barrière au gel si elle est maintenue humide. Ceci est parfaitement démontré lorsqu'on compare les calculs 002 et 003 qui ont les mêmes données d'entrée à l'exception des teneurs en eau de la partie supérieure du talus (sur 1,5 m). La variation de la teneur en eau de 22 % à 10 % induit la progression du gel en profondeur de 0,94 m à 1,40 m. Car le gel de l'eau contenue dans le sol est le phénomène qui consomme la plus grande part de l'énergie thermique. C'est donc la valeur de la chaleur latente de congélation de l'eau qui détermine la majeure partie des échanges thermiques.

- Le concassé calcaire devant servir de barrière aux organismes fousseurs ou racinaires risque de gélifracrer (il est en effet gelé dans le cas de la simulation centennale) et donc de ne pas remplir entièrement son rôle.

- Au dessus du concassé calcaire la progression du gel est accélérée, car son aspect isolant freine aussi le flux terrestre et les échanges de chaleur entre les différents matériaux.

La couche argileuse d'étanchéité semble à l'abri des gelées centennales et millennales si toutefois les valeurs réelles de conductivités des matériaux sont inférieures aux valeurs prises lors des calculs. Par contre on prendra soin de ne pas laisser geler la couche argileuse d'étanchéité après son compactage pendant la phase de travaux de constitution de la couverture.

Toutefois on peut regretter de ne pas avoir eu la possibilité de caler cette modélisation avec des données mesurées sur planches d'essais ou modèles physiques, au cours de cette étude.

## 5. Conclusion

Comme Benson (1995) l'a montré, la perméabilité des argiles compactée est très sensible au gel. Il est donc très important d'en tenir compte dans le dimensionnement des couvertures dont l'imperméabilisation réside dans la couche argileuse. De plus, des structures annexes peuvent également nécessiter une mise hors gel (réseau de collecte des eaux de drainage de la couverture ...).

Pour évaluer la profondeur atteinte par le gel au cours d'un hiver rigoureux, nous avons présenté deux méthodes. La première appliquée au sol de la station de Paris - Monsouris n'est a priori pas applicable aux problèmes posés par les couvertures de stockage de matériaux puisque très peu de stations météorologiques françaises enregistrent la température du sol. Toutefois les résultats très fiables de cette méthode, très simple d'utilisation, doivent servir, de notre point de vue, pour la critique de l'étude plus spécifique réalisée avec la deuxième méthode. Ces deux méthodes font intervenir des ajustements statistiques de valeurs maximales annuelles des températures ou des indices de gel. Nous aurions pu travailler de façon similaire avec des valeurs inférieures à un seuil de température ou supérieures à un seuil d'indice de gel. De plus nous aurions pu compléter cette étude statistique par des ajustements à des loi de distribution moins usitées.

Le modèle de calcul utilisé par la deuxième méthode (logiciel GELSOL) néglige les transferts thermiques de convection, c'est peut-être un point discutable si on estime que les couvertures de stockage sont des milieux perméables. Enfin les conductibilités thermiques et les teneurs en eau sont choisies par l'utilisateur. Ces données, variables dans le temps, influencent de façon très importante les résultats des calculs. Il est donc nécessaire d'utiliser, pour ces données, des « fourchettes » de valeurs comme cela a été fait dans cette étude.

On peut penser que l'étude avec un modèle numérique à deux dimensions n'est pas très intéressante puisqu'elle n'apporte pas de différences majeures alors qu'elle demande un surcroît de travail. Ceci est lié à la géométrie de la couverture choisie qui n'a pas une très forte pente et aux caractéristiques des matériaux. Dans d'autres cas, l'apport de la deuxième dimension pourrait être plus pertinent et donc nous avons choisi de montrer la possibilité d'étudier ces phénomènes pour un stockage de géométrie plus complexe. De plus ces études en 2 dimensions sont souvent réalisées par le Laboratoire des Ponts et Chaussées pour les structures routières et parfaitement rodées. Les données climatiques ont donc été collectées et déjà traitées. Enfin le logiciel de modélisation a été validé par des expérimentations de grande importance à la station de gel de Caen. Le logiciel GELSOL permet de faire des calculs relativement rapides et donc de simuler les effets de différents scénarios climatiques sur différents projets de couvertures. Ces calculs sont très intéressants dans le choix de variante pour les couvertures de stockage. Ainsi on peut penser que cette méthode serait aisément applicable à d'autres sites.

## Chapitre 5 - Prévision des épaisseurs de dessiccation

---

Afin d'évaluer l'épaisseur de sol affectée par une sécheresse, nous avons tout d'abord essayé de quantifier la sécheresse. La façon d'appréhender ce phénomène et d'évaluer son ampleur est très liée au domaine de compétence et aux préoccupations concrètes de l'opérateur : agronome, pédologue, météorologiste... En géologie de l'ingénieur, la quantification de ce phénomène a été peu étudiée jusqu'à présent mais commence à intéresser les constructeurs à la suite des dernières "catastrophes" (fissuration des bâtiments due aux tassements et au retrait) et en raison des nouvelles réglementations pour les stockages de matériaux. Nous avons donc essayé de trouver dans la bibliographie des autres domaines concernés par ce phénomène des indices de sécheresse qui seraient applicables à notre problématique.

### 1. Indices de sécheresse

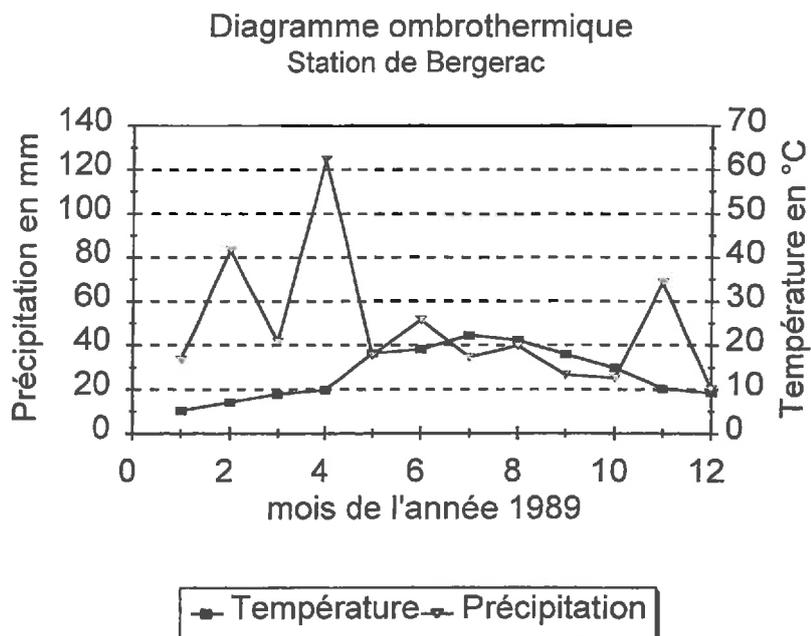
#### 1.1. *Revue bibliographique*

La recherche bibliographique d'indices de sécheresse et la synthèse de cette recherche ont été réalisées avec N. Velly (1996). Les données fournies par la station météorologique de Bergerac serviront pour alimenter nos calculs. Cette station est en effet située à proximité d'un site étudié pour un éventuel Centre d'Enfouissement Technique.

On peut distinguer 4 types d'indices de sécheresse : les indices descriptifs, les indices d'anomalie de précipitation, les indices comparant les précipitations aux besoins en eau, et enfin les indices récursifs qui tiennent compte du niveau de sécheresse du mois précédent pour calculer celui du mois courant. Nous avons confronté ces divers indices à l'étude de la sécheresse de l'année 1989 à Bergerac.

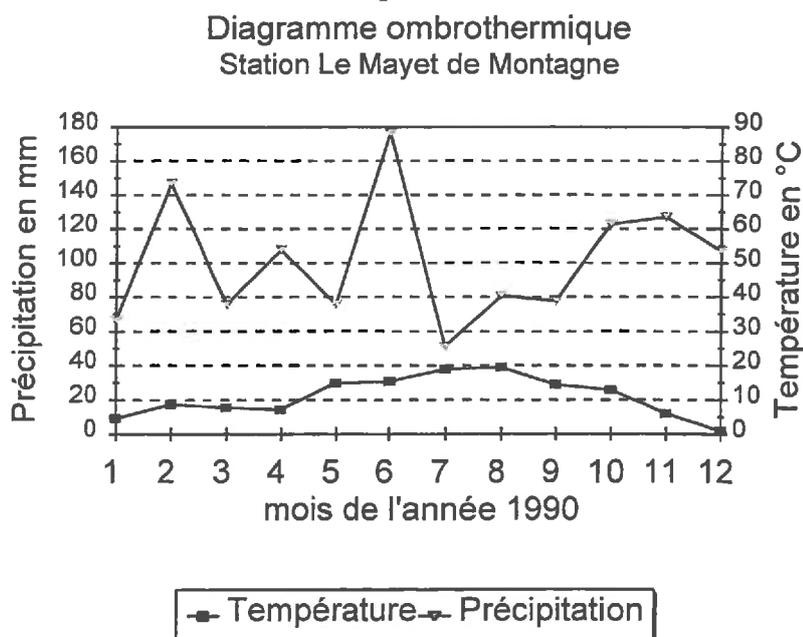
##### 1.1.1. Indice descriptif

Nous citons, à titre d'exemple, le diagramme ombrothermique. Présenté par H. Gausson en 1921, c'est la représentation dans un repère spécifique des courbes des températures et des précipitations mensuelles. En région tempérée ou froide, l'échelle des précipitations en millimètres est égale à la moitié de l'échelle des températures en degrés Celsius. Avec ce choix des échelles il apparaît que chaque fois que la courbe des précipitations est au dessous de celle des températures le mois est "sec". Pour les régions intertropicales le rapport des échelles est de 1/5 au lieu de 1/2. Les conventions de ce diagramme permettent de comparer le climat de diverses stations.



**Figure 5. 1 : Diagramme ombrothermique de Bergerac**

On constate que pour le cas de l'année 1989 à Bergerac, ce phénomène est bien visible sur le diagramme de la figure 5.1. En effet, de juillet à octobre, on observe un déficit hydrique. Toutefois cet indice descriptif ne donne pas d'indications sur l'importance de la sécheresse. De plus ce diagramme est parfois faussé par d'autres paramètres. Ainsi pour une année de sécheresse reconnue (1990) à la station du Mayet de Montagne (Allier), le diagramme ombrothermique de la figure 5.2 ne fait pas apparaître de déficit hydrique. Ceci est probablement dû à l'altitude de cette station qui est d'environ 800 m.



**Figure 5. 2 : Diagramme ombrothermique au Mayet de Montagne**

### 1.1.2. Indices d'anomalie de précipitations

Les indices d'anomalie de précipitations sont basés sur le principe que les sécheresses sont liées aux précipitations tombées durant la période précédente (entre un mois et un an). Ainsi certains auteurs ont proposé de mesurer la sévérité d'une sécheresse en tenant compte uniquement des données de précipitations.

Or les anomalies de précipitations pour des régions inhomogènes ou de grandes zones dont les conditions climatiques sont variées, ne sont pas comparables. Ce problème peut être évité en utilisant des valeurs relatives ou standard.

Les valeurs relatives sont les suivantes :

- quantité de précipitations relative ( $rP$ )

$$rP = \frac{P}{\mu(P)} \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

avec  $P$  le total des précipitations mensuelles

$\mu(P)$  la moyenne interannuelle pour ce mois dans une longue série.

On note que lorsque  $rP$  est inférieur à 100 les précipitations sont inférieures aux normales saisonnières.

- indice d'anomalie relative ( $rAI$ )

$$rAI = \frac{[P - \mu(P)]}{\mu(P)} \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

Si  $rAI$  est négatif, les précipitations sont inférieures à la moyenne du mois considéré.

On peut utiliser l'indice suivant comme valeur standard :

- indice d'anomalie standard ( $SAI$ )

$$SAI = \frac{P - \mu(P)}{\sigma(P)}$$

avec  $\sigma(P)$  l'écart-type de la série des précipitations mensuelles du mois fixé.

Lorsque  $SAI$  est compris entre 0 et -2 le mois est sec.

### 1.1.3. Indices «alimentation / demande» basés sur l'équilibre hydrique

Ces indices permettent de considérer d'une part l'alimentation caractérisée par les précipitations et d'autre part la demande des plantes et du sol que l'on exprime habituellement soit par l'évapotranspiration potentielle soit par sa plus simple approximation, la température moyenne de la période considérée.

- indice de sécheresse de Ped ( $PDII$ )

$$PDII = \frac{\Delta T}{\sigma(T)} - \frac{\Delta P}{\sigma(P)}$$

avec  $\Delta P = P - \mu(P)$  (mm)

$\Delta T = T - \mu(T)$  (°C)

Plus le  $PDII$  est grand plus la période est sèche.

- quelques indices contiennent le paramètre évapotranspiration potentielle sous la forme du rapport de l'évapotranspiration potentielle sur les précipitations :

### ETP/P

Ces indices, en comparant l'évapotranspiration aux précipitations, permettent de déterminer si un mois est humide (cas où l'indice est inférieur à 1) ou sec .

On notera pour chacun de ces indices la simplicité des calculs. De plus, les paramètres qui interviennent dans ces indices sont tous disponibles à partir de séries de données de précipitations et températures.

Les calculs de ces indices pour l'année 1989 à Bergerac sont présentés dans le tableau 5.1. et 5.2. L'analyse de la pertinence de ces indices est également présentée au paragraphe 1.1.5.

**Tableau 5. 1 : Moyennes et écarts-type des précipitations (en mm) et des températures mensuelles (en °C) à Bergerac pour la période 1930-1995**

	$\mu(P)$ en mm	$\sigma(P)$ en mm	$\mu(T)$ en °C	$\sigma(T)$ en °C
Jan	68.0	37.87	4.95	1.94
Fév	61.1	33.97	6.15	2.32
Mar	56.3	30.41	8.80	1.42
Avr	59.8	34.90	11.30	1.35
Mai	69.3	35.45	14.85	1.38
Jun	58.4	33.84	18.30	1.27
Jul	50.0	33.06	20.45	1.40
Août	61.5	42.29	20.05	1.36
Sep	65.7	40.98	17.60	1.50
Oct	68.3	47.40	13.40	1.54
Nov	69.0	35.29	8.60	1.59
Déc	83.0	55.56	5.60	1.77

Comme on le voit sur la figure 5.3, les indices d'anomalie de précipitation révèlent très bien ces anomalies. Par exemple de mai 1989 à janvier 1990 rP est toujours inférieur à 100 % et il est en moyenne égal à 60 %. Sur cette période rAI est toujours négatif et SAI est proche de -1. Toutefois la dessiccation liée aux températures n'est pas traduite par ces indices puisque non prise en compte. Ainsi les indices rP, rAI et SAI du mois de février 1990 traduisent un excédent pluviométrique alors que ce mois a été particulièrement "chaud" par rapport aux normales saisonnières. Pour notre étude ces indices ne semblent donc pas adaptés.

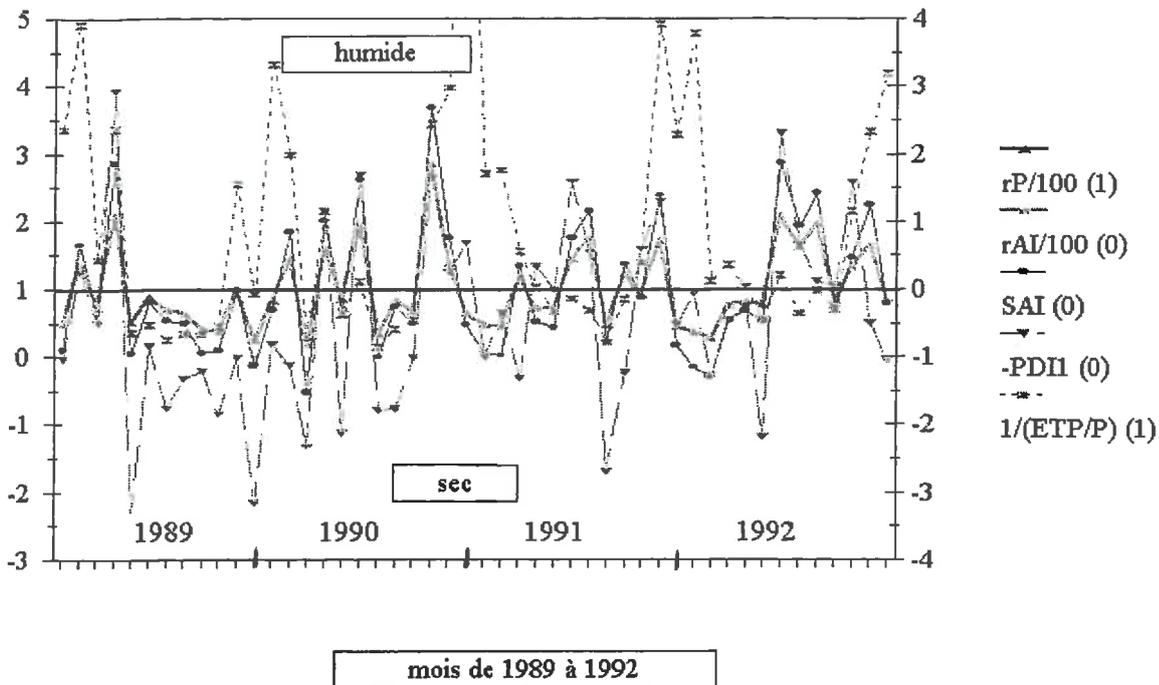
Les indices "alimentation / demande" révèlent mieux les déficits hydriques qui résultent à la fois de précipitations faibles et de températures élevées. Le PDI1 cumule l'anomalie standard de précipitation et l'anomalie standard de température alors que le rapport ETP/P les conjugue. Les valeurs du PDI1 supérieures à 1 traduisent des mois secs comme les valeurs d'ETP/P supérieures à 2. On constate que ces indices n'évoluent pas toujours dans le même sens comme en octobre - novembre 1990 et en octobre - novembre - décembre 1992. Ceci est dû au fait que le PDI1 traduit une anomalie inhabituelle pour la station alors que le rapport ETP/P révèle un déficit hydrique absolu. On peut également regretter que ces indices ne tiennent pas compte du bilan hydrique des mois précédents.

**Tableau 5. 2 : Calcul des indices de sécheresse à Bergerac pour la période 1989-1992**

Données de Bergerac Tabacs de 1989  
Département : Dordogne

Latitude : 44°5N    Longitude : 0°31E    altitude : 33 m  
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de  
Thornthwaite

Année	Mois	P (mm)	T (°C)	ETP (mm)	rP (en %)	rAI (en %)	SAI	PDII	ETP/P
1989	Jan	33.6	5.2	10	49.4	-50.6	-0.9	1.0	0.3
1989	Fév	83.4	7.1	17	136.5	36.5	0.7	-0.2	0.2
1989	Mar	41.6	8.9	29	73.9	-26.1	-0.5	0.5	0.7
1989	Avr	124.6	9.9	37	208.4	108.4	1.9	-2.9	0.3
1989	Mai	35.4	18.2	100	51.1	-48.9	-1.0	3.4	2.8
1989	Jun	51.6	19.1	109	88.4	-11.6	-0.2	0.8	2.1
1989	Jul	34.6	22.3	136	69.2	-30.8	-0.5	1.8	3.9
1989	Août	39.8	21.2	117	64.7	-35.3	-0.5	1.3	2.9
1989	Sep	26.6	18.0	80	40.5	-59.5	-1.0	1.2	3.0
1989	Oct	25.2	14.9	56	36.9	-63.1	-0.9	1.9	2.2
1989	Nov	68.6	10.2	27	99.4	-0.6	-0.0	1.0	0.4
1989	Déc	20.2	9.2	22	24.3	-75.7	-1.1	3.2	1.1
1990	Jan	56.2	6.0	13	82.6	-17.4	-0.3	0.8	0.2
1990	Fév	89.4	10.7	30	146.3	46.3	0.8	1.1	0.3
1990	Mar	10	10.0	34	17.8	-82.2	-1.5	2.3	3.4
1990	Avr	95	11.1	44	158.9	58.9	1.0	-1.2	0.5
1990	Mai	58.2	17.4	94	84.0	-16.0	-0.3	2.1	1.6
1990	Jun	112.8	18.2	101	193.2	93.2	1.6	-1.7	0.9
1990	Jul	16.6	21.6	130	33.2	-66.8	-1.0	1.8	7.8
1990	Août	50.6	22.1	124	82.3	-17.7	-0.3	1.8	2.5
1990	Sep	44.4	18.4	83	67.6	-32.4	-0.5	1.0	1.9
1990	Oct	195.4	15.0	57	286.1	186.1	2.7	-1.6	0.3
1990	Nov	95.4	9.4	24	138.3	38.3	0.7	-0.2	0.3
1990	Déc	53.2	3.5	5	64.1	-35.9	-0.5	-0.7	0.1
1991	Jan	32.4	5.1	12	47.6	-52.4	-0.9	1.0	0.4
1991	Fév	27.6	4.7	10	45.2	-54.8	-1.0	0.4	0.4
1991	Mar	66.4	11.2	43	117.9	17.9	0.3	1.3	0.6
1991	Avr	42.8	10.2	42	71.6	-28.4	-0.5	-0.3	1.0
1991	Mai	49	14.1	73	70.7	-29.3	-0.6	0.0	1.5
1991	Jun	83.8	17.3	98	143.5	43.5	0.8	-1.6	1.2
1991	Jul	88.2	21.3	130	176.4	76.4	1.2	-0.5	1.5
1991	Août	28.4	22.7	131	46.2	-53.8	-0.8	2.7	4.6
1991	Sep	80.8	20.0	95	123.0	23.0	0.4	1.2	1.2
1991	Oct	62.4	12.3	45	91.4	-8.6	-0.1	-0.6	0.7
1991	Nov	117.8	8.8	24	170.7	70.7	1.4	-1.3	0.2
1991	Déc	36	5.1	11	43.4	-56.6	-0.8	0.5	0.3
1992	Jan	23.9	2.8	5	35.1	-64.9	-1.2	0.1	0.2
1992	Fév	16.7	6.1	15	27.3	-72.7	-1.3	1.3	0.9
1992	Mar	42.1	8.9	31	74.8	-25.2	-0.5	0.5	0.7
1992	Avr	48.2	11.2	47	80.6	-19.4	-0.3	0.3	1.0
1992	Mai	52	17.2	95	75.0	-25.0	-0.5	2.2	1.8
1992	Jun	121.6	17.8	101	208.2	108.2	1.9	-2.3	0.8
1992	Jul	80.4	20.9	127	160.8	60.8	0.9	-0.6	1.6
1992	Août	121	21.8	124	196.7	96.7	1.4	-0.1	1.0
1992	Sep	53.6	17.1	77	81.6	-18.4	-0.3	-0.0	1.4
1992	Oct	90.6	11.7	42	132.7	32.7	0.5	-1.6	0.5
1992	Nov	113	11.4	34	163.8	63.8	1.2	0.5	0.3
1992	Déc	71	7.1	17	85.5	-14.5	-0.2	1.1	0.2



**Figure 5. 3 : Comparaison de l'évolution des indices de sécheresse sur 4 ans à Bergerac**  
 (La valeur de référence et donc l'axe des ordonnées correspondant est entre parenthèses dans la légende, on notera qu'ainsi les courbes des indices rP et rAI se superposent.)

#### 1.1.4. Indice récursif : PDSI

Les indices récursifs tendent à estimer la sécheresse du mois courant à partir de l'estimation de la sécheresse du mois précédent.

##### 1.1.4.1. Présentation du PDSI

W.C. Palmer en 1965 a proposé l'indice de sévérité de la sécheresse : Palmer Drought Severity Index (PDSI). Cet indice compare le bilan hydrique du mois courant au bilan hydrique de ce mois moyenné sur 30 ans. Si ce bilan est déficitaire l'indice du mois précédent est diminué du déficit ainsi calculé et cette différence représente l'indice du mois courant. Nous ne donnerons que quelques indications sur la méthode qui est très détaillée dans la revue citée en référence. Cet indice prend des valeurs sur une échelle allant de +7 à -7 et permet de classer une période climatique par rapport à une autre.

<i>PDSI</i>	caractère de la période
$4,00 \leq PDSI$	extrêmement humide
$3 \leq PDSI < 4$	humidité sévère
$1,5 \leq PDSI < 3$	humidité moyenne à modérée
$-1,5 < PDSI < 1,5$	humidité normale
$-3 < PDSI \leq -1,5$	sécheresse moyenne à modérée
$-4 < PDSI \leq -3$	sécheresse sévère
$PDSI \leq -4$	sécheresse extrême

Le calcul de cet indice mensuel est assez complexe. Ce calcul fait appel aux résultats des équations de bilan d'eau sur un ensemble de deux couches de sol.

Rappel du bilan d'eau, toutes les quantités sont des hauteurs de tranche d'eau exprimées en pouces (1 pouce = 25,4 mm) :

- $P$  : hauteur des précipitations ;
- $ETP$  : évapotranspiration potentielle ;
- $RO$  : ruissellement et perte par infiltration de la couche inférieure ;
- $S_s$  : réserve d'eau utilisable dans la couche supérieure ;
- $S_u$  : réserve d'eau utilisable dans la couche inférieure ;
- $R_s$  : recharge d'eau de la couche supérieure ;
- $R_u$  : recharge d'eau de la couche inférieure ;
- $L_s$  ou  $ET$  : perte en eau de la couche supérieure ;
- $L_u$  : perte en eau de la couche inférieure ;
- $AWC_s$  : capacité au champs de la couche supérieure (réserve maximale) ;
- $AWC_u$  : capacité au champs de la couche inférieure (réserve maximale).

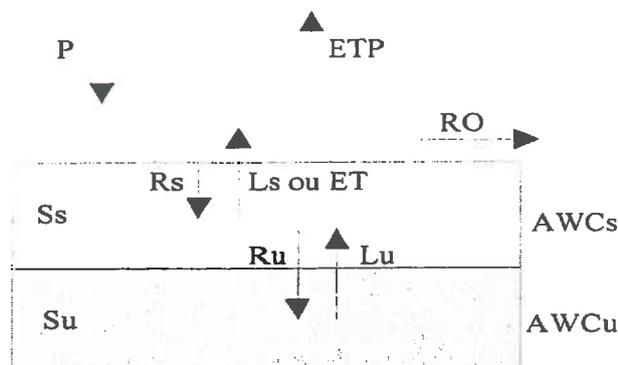


Figure 5. 4 : Bilan d'eau sur 2 couches superposées

Le calcul du  $PDSI$  revient à comparer le bilan d'eau d'un mois avec le bilan d'eau moyen, pour ce même mois, établi à partir de données sur 30 ans.

Les données sont les précipitations mensuelles ( $P$ ) et l'évapotranspiration potentielle ( $ETP$  calculée à partir de la formule de Thornthwaite), la réserve maximale du sol ( $AWC_s$  et  $AWC_u$ ) et le stock contenu dans le sol dans les conditions initiales ( $S_s$  et  $S_u$ ). A partir d'un bilan d'eau basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices, on calcule  $ET$ ,  $R_s + R_u$ ,  $RO$ , et  $L_u$  pour tous les mois sur 30 ans ou plus. On calcule également  $PR$ ,  $PRO$ ,  $PL$  respectivement recharge potentielle, ruissellement potentiel et perte d'eau potentielle grâce aux équations suivantes.

La recharge potentielle est la quantité d'eau nécessaire pour remplir le stock d'eau.

$$PR = (AWC_u + AWC_s) - (S_s + S_u)$$

Le ruissellement potentiel est d'après Wishmeier et sous certaines conditions égal à la réserve maximale moins la recharge potentielle.

$$PRO = S_s + S_u$$

La perte d'eau potentielle correspond à la quantité d'eau que pourrait perdre le sol par évaporation à condition que les précipitations soient nulles.

$$PL = PLs + PLu \text{ avec } PLs = \min(ETP, Ss) \text{ et } PLu = (ETP - PLs) Su / (AWCu + AWCs) \text{ et } Plu < Su$$

Ensuite, on calcule les valeurs surlignées  $\bar{P}$ ,  $\bar{ET}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{RO}$ ,  $\bar{L}$  qui sont des moyennes mensuelles interannuelles (sur 30 ans) de  $P$ ,  $ET$ ,  $R$ ,  $RO$ ,  $L$ . On calcule également les moyennes interannuelles sur 30 ans :  $\overline{ETP}$ ,  $\overline{PR}$ ,  $\overline{PRO}$ ,  $\overline{PL}$ .

On calcule ensuite les valeurs avec accent circonflexe  $\hat{X}$  qui sont des valeurs calculées à partir des conditions climatiques existantes et des moyennes interannuelles.

$$\hat{ET} = \frac{\bar{ET}}{\overline{ETP}} \cdot PET = \alpha \cdot ETP \quad \text{et} \quad \hat{R} = \frac{\bar{R}}{\overline{PR}} \cdot PR = \beta \cdot PR$$

$$\hat{RO} = \frac{\bar{RO}}{\overline{PRO}} \cdot PRO = \gamma \cdot PRO \quad \text{et} \quad \hat{L} = \frac{\bar{L}}{\overline{PL}} \cdot PL = \delta \cdot PL$$

Le bilan d'eau s'écrit :

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L}$$

On calcule donc  $\hat{P}$  et  $d$ .

$$d = P - \hat{P}$$

$$\text{On calcule alors : } K'i = 1,5 \cdot \log \left[ \left( \frac{\overline{ETP} + \bar{R} + \bar{RO}}{\bar{P} + \bar{L}} + 2,80 \right) \div \bar{D}i \right] + 0,5$$

$\bar{D}i$  est la moyenne inter-annuelle des valeurs absolues de  $d$  pour le mois  $i$ .

$$\text{et } Ki = \frac{17,67}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}i \cdot K'i} \cdot K'i$$

$$Zi = d \cdot Ki$$

Le  $PDSI$  d'un mois  $i$  dépend de celui du mois précédent :

$$PDSI_i = (0,897 \cdot PDSI_{i-1}) + \frac{Zi}{3}$$

#### 1.1.4.2. Calcul du $PDSI$ à Bergerac sur 65 années

Nous avons appliqué ces calculs à Bergerac. Les moyennes sont établies sur 65 années et non sur 30. Ceci donne plutôt de meilleurs résultats pour le  $PDSI$ . Les valeurs inférieures à -1,5 (sécheresses modérées à sévères) sont en caractère gras.

**Tableau 5.3 :  $PDSI$  à Bergerac de 1930 à 1995**

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1930	0.57	4.73	4.84	4.71	4.02	3.54	3.31	2.36	1.65	2.65	2.41	2.49
1931	2.61	2.82	3.12	2.96	2.90	2.34	2.68	4.33	4.40	3.69	3.93	3.32

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1932	2.76	1.94	1.98	2.08	2.80	3.37	3.86	3.30	3.56	3.94	3.28	2.11
1933	1.24	1.28	1.26	0.64	0.37	1.00	0.22	-0.64	0.51	0.45	-0.14	-1.16
1934	-1.76	-2.51	-1.62	-1.01	-1.40	-0.88	-1.23	-0.25	-0.47	-0.64	-0.72	1.73
1935	1.44	2.14	1.92	2.76	2.28	2.07	2.04	2.10	2.22	2.11	2.69	4.69
1936	5.13	5.09	4.53	4.19	3.27	2.72	3.48	2.54	1.66	1.02	0.94	-0.59
1937	-1.23	-0.82	-0.11	0.40	0.00	0.33	0.19	-0.42	-0.54	0.98	0.94	2.41
1938	2.90	2.15	1.24	0.37	0.65	0.14	0.67	0.13	1.24	1.27	1.55	1.30
1939	2.31	2.06	2.35	1.98	1.90	1.81	1.94	1.80	1.09	0.94	0.83	0.65
1940	0.40	0.44	0.31	0.63	1.00	1.16	1.08	0.54	0.39	0.54	0.94	1.70
1941	2.19	2.62	2.37	1.90	2.27	2.53	2.95	4.05	3.81	3.20	3.49	2.55
1942	3.24	2.62	2.15	1.57	1.22	0.91	1.31	1.12	0.98	0.47	-0.22	-1.13
1943	-1.24	-1.61	-1.83	-2.36	-2.70	-2.98	-2.63	-2.95	-2.37	-1.38	-0.88	-1.04
1944	-1.44	-1.47	-1.76	-1.70	-2.12	-2.40	-1.90	-1.61	-1.75	-0.89	0.22	1.53
1945	2.13	1.60	1.23	0.48	0.35	0.07	-0.24	-0.13	-0.75	-1.64	-1.80	-1.15
1946	-2.00	-1.99	-2.14	-1.82	-0.87	-1.11	-1.26	-1.13	-1.72	-1.72	-1.42	-0.69
1947	-0.30	0.16	0.28	-0.09	-0.40	-0.53	-1.07	-0.44	-0.44	-0.99	-1.47	-1.51
1948	-0.41	-0.90	-1.45	-1.57	-1.34	-1.38	-1.64	-1.17	-1.37	-2.08	-2.74	-3.89
1949	-4.81	-5.66	-5.59	-5.68	-4.94	-4.92	-5.81	-6.50	-6.27	-6.34	-4.67	-4.56
1950	-4.89	-3.93	-3.53	-2.92	-2.47	-2.35	-2.63	-1.95	-2.58	-3.08	-2.08	-1.44
1951	-0.91	-0.09	0.54	0.16	0.80	1.47	0.88	1.27	0.94	0.10	-0.11	-0.31
1952	0.21	0.25	0.15	-0.05	-0.61	-1.22	-1.87	-1.79	-1.83	-0.99	-0.22	1.30
1953	0.79	0.70	0.02	0.17	-0.56	-0.20	0.44	-0.46	-0.12	-0.65	-1.26	-3.14
1954	-3.78	-3.52	-3.02	-3.02	-3.20	-3.13	-2.99	-2.57	-2.46	-2.11	-2.19	-2.43
1955	-0.98	-0.46	-0.82	-1.53	-1.70	-0.78	-0.39	-0.81	-1.27	-1.79	-2.42	-2.02
1956	-2.25	-2.42	-2.68	-2.60	-2.73	-2.76	-2.34	-1.75	-2.12	-2.58	-2.81	-3.62
1957	-4.13	-3.40	-3.19	-3.21	-3.07	-2.14	-1.51	-2.05	-1.44	-1.94	-2.26	-3.15
1958	-2.89	-3.34	-2.61	-2.48	-2.23	-1.46	-0.80	-0.13	-0.30	-0.78	-0.99	-0.20
1959	0.14	-0.26	-0.18	0.63	0.48	0.06	-0.41	0.47	0.15	0.15	0.04	2.61
1960	2.69	2.82	2.86	2.24	1.98	1.72	1.73	3.03	4.30	5.93	6.16	6.51
1961	6.49	5.68	4.44	4.01	3.41	2.53	2.04	1.11	0.30	0.19	0.24	0.22
1962	0.29	-0.02	0.05	0.11	0.56	-0.04	0.09	-0.78	-1.30	-2.00	-0.94	-1.18
1963	-1.45	-1.07	-0.32	-0.47	-0.78	0.53	0.07	1.93	2.31	2.07	1.93	1.61
1964	0.96	0.77	0.63	0.68	1.14	0.77	0.22	-0.24	-1.23	-0.17	-0.67	-1.47
1965	-1.65	-2.24	-2.05	-1.56	-1.72	-2.05	-1.78	-1.99	-0.27	-1.11	-0.31	1.13
1966	1.91	1.94	1.49	1.87	1.46	2.24	2.01	1.93	1.31	1.21	1.16	1.76
1967	1.95	2.03	1.59	0.95	0.85	0.19	-0.31	-0.88	-0.95	-1.02	-1.18	-1.97
1968	-2.29	-2.45	-2.72	-2.50	-2.24	-2.48	-2.13	-1.71	-1.21	-1.87	-2.44	-2.61
1969	-2.77	-3.02	-2.52	-1.73	-1.44	-1.12	-1.47	-1.67	-0.26	-1.36	-0.89	-0.91
1970	-0.72	0.09	0.07	0.26	0.20	0.31	-0.11	-0.17	-1.05	-1.15	-1.18	-2.29
1971	-2.14	-1.85	-1.75	-1.10	0.89	1.09	1.92	2.01	1.58	0.99	1.21	-0.03
1972	0.12	0.15	0.00	-0.14	-0.49	-0.74	-1.31	1.08	0.60	0.19	-0.00	-0.80
1973	-1.06	-0.77	-1.02	-1.10	-0.41	-0.37	0.65	-0.04	-0.22	0.11	0.20	-0.05
1974	-0.44	0.07	0.40	-0.01	-0.35	-0.84	-1.38	-1.06	0.03	0.69	0.81	-0.33
1975	-0.33	-0.71	-0.28	-0.15	-0.37	-0.79	-1.03	-1.43	-0.32	-0.61	-0.54	-1.55
1976	-2.52	-3.05	-3.11	-3.40	-3.20	-3.96	-2.87	-3.15	-2.48	-0.92	-0.08	0.94
1977	1.30	1.82	1.82	1.66	1.80	2.72	2.81	3.13	2.26	1.98	1.52	0.82
1978	1.16	1.50	1.89	1.87	1.44	1.28	1.46	0.88	0.65	-0.56	-1.44	-1.55
1979	-1.35	-0.95	-0.81	-0.36	0.28	-0.21	-0.21	-0.13	-0.50	-0.65	-1.04	-0.66
1980	-0.18	-0.15	0.48	-0.16	-0.19	-0.30	0.13	-0.22	-0.85	-0.34	-0.86	-1.27
1981	-1.45	-1.57	-1.33	-1.56	-0.01	-0.02	0.74	1.25	1.44	2.08	1.50	4.43
1982	4.13	3.61	3.46	2.36	1.75	1.20	0.88	0.50	-0.16	2.28	2.31	4.12
1983	3.21	3.58	3.32	3.73	3.53	2.60	1.98	1.49	0.60	-0.01	-1.07	-1.21
1984	-0.68	-0.54	-0.25	-0.86	-0.38	-0.20	-0.49	0.50	1.28	1.32	2.24	2.05

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1985	2.07	1.76	2.09	1.99	2.50	2.62	2.24	1.69	0.46	-0.84	-0.94	-0.79
1986	0.32	0.52	0.66	2.36	1.97	1.18	0.60	1.13	1.43	0.97	0.31	-0.50
1987	-1.36	-2.08	-2.16	-2.61	-2.99	-2.31	-2.67	-3.05	-3.74	-1.73	-1.26	-1.73
1988	-0.06	0.60	1.68	1.96	2.52	2.47	2.53	1.83	1.32	0.74	-0.28	-1.31
1989	-2.26	-2.19	-2.30	-1.09	-1.68	-1.60	-1.73	-2.01	-2.56	-3.25	-3.27	-4.73
1990	-5.23	-5.04	-5.42	-4.57	-4.48	-3.40	-3.77	-3.70	-3.75	-1.39	-0.54	-0.33
1991	-0.53	-0.71	-0.58	-0.62	-0.73	-0.21	0.40	-0.05	0.20	0.18	0.88	0.22
1992	-0.26	-0.77	-0.84	-0.84	-1.11	-0.04	0.41	1.42	1.35	1.96	2.73	2.76
1993	1.94	1.13	0.65	1.38	1.18	1.79	1.88	2.00	3.69	4.42	4.19	6.87
1994	6.95	7.42	6.10	6.59	6.12	5.68	5.02	4.36	5.21	5.51	4.88	4.36
1995	4.73	4.98	4.77	3.86	3.00	2.13	1.68	1.18	2.10	1.22	1.19	2.65

Le calcul du PDSI est assez long mais les résultats sont intéressants. Le *PDSI* moyen annuel (cf. tableau 5.5) et le *PDSI* moyen mensuel (cf. tableau 5.3) considèrent conjointement comme années sèches depuis 1976 (date depuis laquelle nous disposons des bulletins météorologiques qualitatifs de façon continue) les années suivantes :

- 1976 : la sécheresse débute en décembre 1975 avec un *PDSI* de -1,55 et se termine au mois de septembre avec un *PDSI* de -2,48. En effet pour ce mois-là les précipitations sont encore déficitaires. Cette sécheresse résulte de la succession d'un hiver et surtout d'un printemps et d'un été présentant chacun un déficit hydrique.
- 1987 : le *PDSI* mensuel présente un temps sec de décembre 1986 jusqu'à décembre 1987. Ces prévisions s'écartent quelque peu de la réalité. Le bulletin météorologique note une longue période de sécheresse soumise à des précipitations déficitaires avec un bon ensoleillement de novembre 1986 jusqu'à septembre 1987.
- 1988-1990 : du mois d'août 1988 à septembre 1990, la Dordogne connaît une très longue période de sécheresse. Cette sécheresse qui a touché l'ensemble de la France s'est ressentie au niveau du *PDSI* de décembre 1988 avec -1,31 à octobre 1990 avec -1,39.

Ces quelques sécheresses réelles sont donc assez bien révélées par le *PDSI*. Toutefois, le calcul du *PDSI* a conduit à certaines exagérations. Par exemple, le *PDSI* mensuel de l'année 1949 correspondrait à un état de sécheresse extrême tout au long de l'année.

#### 1.1.5. Comparaison et analyse de la pertinence des indices

On peut affecter à chaque année la moyenne de l'indice mensuel entre avril et septembre - période habituellement chaude et d'humidité insuffisante (cf. tableau 5.1) -. Pour évaluer la pertinence des indices on peut comparer pour chaque année une valeur associée d'après l'échelle de Farago et al (1989). Ainsi on a associé à chaque indice une valeur égale à 2 ou 1 lorsque l'indice traduisait une période de sécheresse ou de sécheresse extrême en fonction des classes de sécheresse établies par Farago et al. (1989) (cf. tableau 5.4).

**Tableau 5. 4 : Classes de sécheresse d'après Farago et al.**

moyenne de l'indice mensuel entre avril et septembre						
Etat	rP(%)	rAI (%)	SAI	PDI1	ETP/P	PDSI
Sécheresse : 2	]50; 70]	] -30; -20]	] -1.0; -0.6]	]1.0; 1.5]	]2.5; 3.5]	] -4.0; -2.0]
Sécheresse extrême : 1	≤50	≤-30	≤-1.0	>1.5	≥3.5	≤-4.0

Tableau 5. 5 : Comparaison de la pertinence des indices de sécheresse

Année	rP(%)	Etat	rAI (%)	Etat	SAI	Etat	PDI1	Etat	ETP/P	Etat	PDSI	Etat
1930	82.6		-17.4		-0.3		0.40		2.3		3.27	
1931	146.0		46.0		0.7		-1.18		1.2		3.27	
1932	148.3		48.3		0.8		-1.15		1.2		3.16	
1933	91.4		-8.6		-0.1		0.88		6.5	1	0.35	
1934	111.4		11.4		0.2		0.45		2.1		-0.87	
1935	128.4		28.4		0.5		-0.33		1.4		2.25	
1936	90.9		-9.1		-0.2		0.02		2.4		2.98	
1937	93.2		-6.9		-0.1		0.45		2.4		-0.01	
1938	109.0		9.0		0.1		-0.25		8.1	1	0.53	
1939	88.8		-11.3		-0.2		-0.38		1.9		1.75	
1940	102.7		2.7		0.1		-0.25		2.2		0.8	
1941	141.6		41.6		0.7		-1.08		1.1		2.92	
1942	98.4		-1.6		-0.1		0.32		1.6		1.19	
1943	87.5		-12.5		-0.3		1.20	2	2.3		-2.66	2
1944	91.4		-8.6		-0.2		0.60		2.3		-1.91	
1945	78.6		-21.4	2	-0.4		1.38	2	2.3		-0.04	
1946	90.4		-9.7		-0.1		0.13		2.5		-1.32	
1947	93.4		-6.6		-0.2		1.73	1	2.8	2	-0.5	
1948	85.9		-14.1		-0.2		0.33		2.4		-1.41	
1949	68.6	2	-31.4	1	-0.5		1.75	1	10.7	1	-5.69	1
1950	85.0		-15.0		-0.2		0.68		3.8	1	-2.48	2
1951	102.2		2.2		0.1		-0.35		3.1	2	0.92	
1952	63.9	2	-36.1	1	-0.6	2	1.35	2	10.3	1	-1.23	
1953	103.5		3.5		0.0		-0.13		4.1	1	-0.12	
1954	77.6		-22.4	2	-0.4		-0.37		2.0		-2.89	2
1955	89.2		-10.8		-0.2		0.16		3.5	1	-1.08	
1956	87.7		-12.3		-0.2		-0.87		1.8		-2.38	2
1957	96.1		-4.0		-0.1		-0.85		6.0	1	-2.24	2
1958	114.8		14.8		0.2		-0.23		1.4		-1.23	
1959	107.5		7.5		0.1		0.51		2.8	2	0.23	
1960	139.8		39.8		0.6		-0.80		1.3		2.5	
1961	65.3	2	-34.8	1	-0.6		1.10	2	3.1	2	2.23	
1962	72.5		-27.5	2	-0.4		0.10		5.1	1	-0.23	
1963	132.3		32.3		0.5		-1.11		2.1		0.6	
1964	71.9		-28.1	2	-0.4		0.77		4.0	1	0.22	
1965	103.9		3.9		0.1		-0.87		2.2		-1.56	
1966	110.2		10.2		0.2		-0.28		1.8		1.8	
1967	54.0	2	-46.0	1	-0.7	2	0.38		4.4	1	-0.02	
1968	106.5		6.5		0.1		-0.60		1.6		-2.05	2
1969	109.9		9.9		0.2		-0.55		3.1	2	-1.28	
1970	76.4		-23.6	2	-0.4		0.38		3.3	2	-0.09	
1971	161.5		61.5		1.1		-0.93		1.3		1.06	
1972	89.6		-10.4		-0.3		-1.25		12.3	1	-0.17	
1973	106.8		6.8		0.2		-0.08		2.4		-0.25	
1974	81.7		-18.4		-0.3		-0.22		5.1	1	-0.6	
1975	86.3		-13.7		-0.3		-0.07		2.8	2	-0.68	

Année	rP(%)	Etat	rAI (%)	Etat	SAI	Etat	PDI1	Etat	ETP/P	Etat	PDSI	Etat
1976	100.8		0.8		-0.0		0.10		3.2	2	-3.18	2
1977	117.2		17.2		0.3		-1.48		2.4		2.4	
1978	84.1		-15.9		-0.3		-0.93		2.0		1.26	
1979	93.3		-6.7		-0.1		-0.75		2.2		-0.19	
1980	71.8		-28.2	2	-0.5		-0.38		2.6	2	-0.27	
1981	137.9		37.9		0.7		-0.85		1.3		0.31	
1982	63.4	2	-36.6	1	-0.6	2	1.08	2	8.3	1	1.09	
1983	84.7		-15.3		-0.2		0.90		3.0	2	2.32	
1984	110.5		10.5		0.2		-0.73		2.1		-0.03	
1985	89.8		-10.3		-0.1		0.27		5.2	1	1.92	
1986	124.4		24.4		0.4		-0.58		3.6	1	1.45	
1987	67.2	2	-32.8	1	-0.6		0.92		3.0	2	-2.9	2
1988	112.9		12.9		0.3		0.03		2.1		2.1	
1989	87.1		-13.0		-0.2		1.08	2	2.5	2	-1.78	
1990	103.2		3.2		0.1		0.63		2.5	2	-3.95	2
1991	105.2		5.2		0.1		0.25		1.8		-0.17	
1992	133.8		33.8		0.5		-0.08		1.3		0.2	
1993	162.4		62.4		1.0		-0.88		1.1		1.99	
1994	138.8		38.8		0.7		-0.13		1.6		5.5	
1995	88.0		-12.0		-0.3		0.80		2.7	2	2.33	

En conclusion, d'après Velly (1996), le diagramme ombrothermique confirme les sécheresses de 1987 et 1989 révélées par le *PDSI* mais ne répond pas de façon satisfaisante pour 1976 et 1990. Il n'est donc pas fiable car il ne révèle en moyenne qu'une sécheresse sur deux. De plus il s'est avéré totalement insatisfaisant pour les stations de moyenne altitude.

Les autres indices présentés dans ce rapport ne sont pas du tout adaptés à notre étude car ils ne révèlent que des sécheresses inhabituelles et non pas des sécheresses absolues, seul le rapport ETP/P les traduit. Toutefois ce rapport qui donne une approche de la sécheresse mensuelle n'est pas directement lié au flux hydrique qui affecte le sol.

Le *PDSI* révèle généralement bien les sécheresses quel que soit le climat. Mais il est parfois en décalage avec la réalité exprimée par les bulletins météorologiques mensuels. En effet, il fait parfois débiter et terminer les sécheresses avec un certain retard de un voire plusieurs mois. Le *PDSI* est parfois excessivement élevé alors qu'il n'a pas lieu de l'être comme en 1949 à Bergerac. Il n'est pas rare qu'il soit aussi un outil non pertinent pour notre étude car il définit comme mois de sécheresses les mois d'hiver où les précipitations sont inférieures aux normales saisonnières. De même, le *PDSI* peut sous-estimer l'ampleur de la sécheresse comme en 1989-1991 en climat continental. Le *PDSI* est globalement insatisfaisant en climat méditerranéen car le *PDSI* est basé sur les écarts des précipitations et des températures à la normale alors que cette région s'avère sèche chaque année d'avril à septembre. De plus, l'effet du vent à l'action particulièrement asséchante sur les sols n'est absolument pas prise en compte.

#### 1.1.6. Conclusions et remarques

Dans le cadre de notre étude, les indices de sécheresse étudiés ou le diagramme ombrothermique ne peuvent garantir l'existence d'une sécheresse. Chacun de ces outils est

donc à utiliser avec précautions. Toutefois, le *PDSI* est l'indice le plus fiable à notre disposition pour l'instant. Mais ses défauts soulignés au paragraphe 1.1.5, le rendent inadapté à caractériser l'ensemble des sécheresses en climat océanique, méditerranéen et continental. L'erreur que l'on risque de commettre avec l'approche climatique de Palmer est de montrer des anomalies par rapport à ce qui est attendu alors qu'il faudrait montrer les excès et les contrastes qui sont à l'origine des actions érosives ou dommageables sur les couvertures.

### *1.2. Nouvel indice adapté aux calculs des épaisseurs de dessiccation*

La recherche bibliographique n'ayant pas révélé d'indice qui nous satisfasse totalement nous avons donc essayé de définir un nouvel indice de sécheresse adapté au calcul des épaisseurs de dessiccation.

Cette étude nous a tout de même permis de définir quelques impératifs à intégrer au cahier des charges de ce nouvel indice :

- Les indices basés sur l'équilibre hydrique sont des outils intéressants qui permettent l'observation des déficits hydriques des périodes estivales ;
- Cet indice devra être calculé sur une période inférieure au mois car au delà du mois et comme le *PDSI* cet indice pourrait révéler les sécheresses avec un décalage;
- Il nécessitera une maîtrise du calcul de l'évapotranspiration potentielle qui tienne compte du vent ;
- Il ne devra pas nécessiter une très longue période de données météorologiques car au delà de 30 années peu de stations disposent d'un jeu de données complet.

La mise au point de cet indice s'est largement inspiré de l'indice de gel présenté au chapitre 4. En effet, nous avons essayé d'établir un indice de sécheresse basé sur les flux hydriques. Le flux hydrique vertical est le résultat des précipitations et de l'évapotranspiration calculée par la formule de Penman qui tient compte de l'effet desséchant du vent. Nous allons voir si, pour une période considérée, l'épaisseur de sol asséché peut être liée à la quantité d'eau extraite du sol.

#### 1.2.1. Définition

L'indice de sécheresse proposé est égal à la quantité d'eau supposée maximale extraite du sol pendant la période sèche considérée, en millimètres d'eau. Cette quantité peut être approchée en faisant la différence arithmétique entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations. Pour calculer l'évapotranspiration, nous utiliserons la formule de Penman qui tient compte de l'effet évaporant du vent.

Nous remarquons que cet indice de sécheresse suppose que la réserve d'eau du sol est inépuisable et toujours disponible, ce qui est généralement faux. Toutefois dans le cas des couvertures de stockage de déchet, la couverture enherbée est au contact du gradient hydrique de la couche argileuse et cette couche a une très grande « inertie » vis à vis de sa teneur en eau puisque sa conductivité est très faible. Donc nous pouvons admettre ce principe dans le cas qui nous préoccupe.

Cette première erreur est en partie compensée par une deuxième étant donné que les précipitations efficaces sont inférieures aux précipitations mesurées suite au ruissellement. Ces 2 erreurs sont donc réduites par le calcul de l'indice.

Si on calcule la valeur cumulée de cette différence sur une année, on peut exprimer cet indice en mm.J.

### 1.2.2. Exemple de calcul

Nous allons calculer l'indice de sécheresse de l'année 1989 à la station météorologique de Bergerac. Le calcul de l'indice de sécheresse est établi à partir des données quotidiennes même lorsque l'indice est annuel (c'est alors le cumul des indices quotidiens).

#### 1.2.2.1. Calcul de l'évapotranspiration

Nous avons choisi pour calculer l'évapotranspiration, la formule de Penman. En effet elle est établie à partir d'un bilan hydrique et tient compte du vent.

$$ETP = \left[ I_{ga} (1 - a) \left( 0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \sigma T^4 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}) \left( 0,10 + 0,90 \frac{h}{H} \right) \right] \cdot \frac{1}{59} \cdot \frac{F_T'}{\gamma + F_T'} + \frac{0,26\gamma}{\gamma + F_T'} (e_w - e) (1 +$$

avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle journalière (mm.j<sup>-1</sup>)
- I<sub>ga</sub> : radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (cal.cm<sup>-2</sup>)
- a: albédo de la surface évaporante
- h : durée réelle d'insolation (h.j<sup>-1</sup>)
- H : durée astronomique moyenne du jour, valeurs mensuelles moyennes (h.j<sup>-1</sup>)
- σ : constante de Stephan-Boltzmann (1,18.10<sup>-7</sup> cal.cm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> ou 8,22.10<sup>-11</sup> cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)
- T : température moyenne (K)
- e : tension réelle de la vapeur d'eau mesurée sous abri (mbar)
- F<sub>T</sub>' : pente de la courbe de tension maximale de vapeur d'eau
- γ : constante psychrométrique (γ≅0,65 pour les pressions voisines de 1015 mbar)
- e<sub>w</sub> : tension maximale de la vapeur d'eau pour la température T (mbar)
- V : vitesse moyenne du vent (m.s<sup>-1</sup>)
- n : facteur fonction de l'altitude de mesure de la vitesse du vent
  - si la vitesse du vent est mesurée à 10 m, n=0,4
  - si la vitesse du vent est mesurée à 2 m, n=0,54

Nota :

- I<sub>ga</sub> et H fonctions de la latitude et du mois sont disponibles dans les tables de Brochet et Gerbier (1968)
- A titre indicatif, quelques albédos moyens

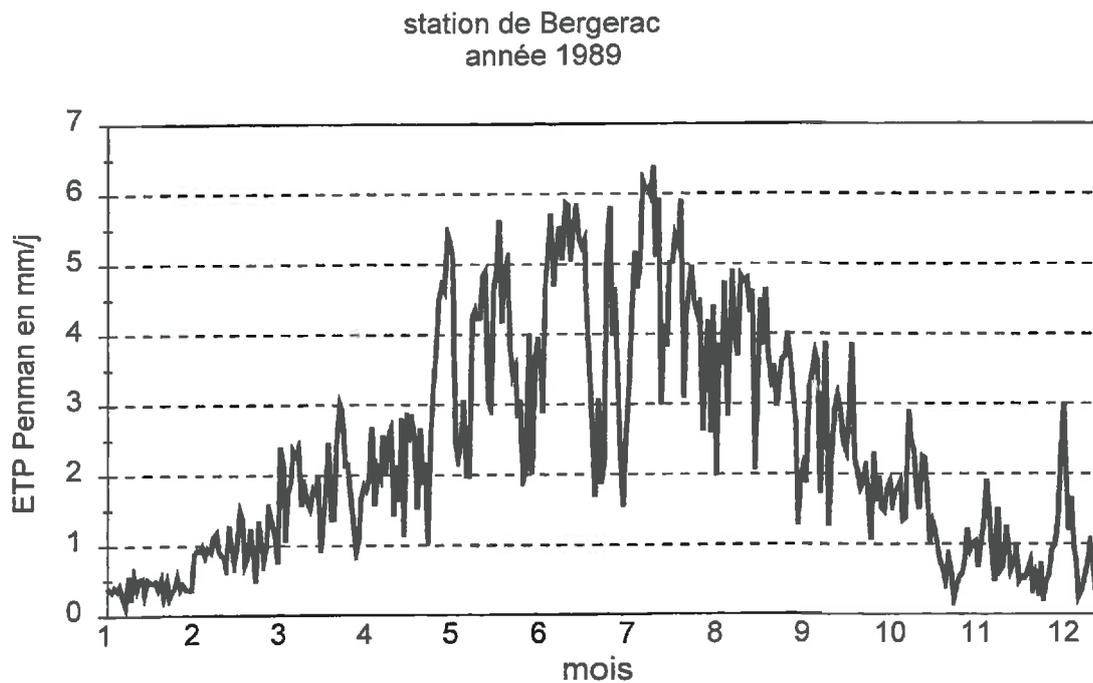
nature de la surface	albédos moyens
sable clair	0,26
rochers	0,16
forêts	0,11
herbes, savanes	0,22
cultures vertes	0,20
neige fraîche	0,80 à 0,90
neige fondante, glace	0,40 à 0,60
nappe d'eau	0,05 à 0,15

Nous avons choisi un albédo de 0,22 puisque la couverture finale des stockages est enherbée.

- $\frac{1}{59} \frac{F'_T}{\gamma + F'_T}$ ,  $\frac{0,26\gamma}{\gamma + F'_T}$  et  $e_w - e$  sont donnés sous forme de table en fonction de la température par Brochet et Gerbier (1974)
- V, e, T, h doivent faire l'objet d'une demande auprès des stations de Météo-France.

Les résultats du calcul de l'évapotranspiration potentielle sont présentés sur la figure 5.5.

Le cumul annuel de l'évapotranspiration potentielle est de 862 mm d'eau. Pour calculer la quantité d'eau extraite du sol, nous ferons la différence évapotranspiration potentielle - précipitations.



**Figure 5. 5 : Evapotranspiration potentielle à Bergerac pour l'année 1989**

### 1.2.3. Précipitations

La figure 5.6 présente les données de précipitations de la station de Bergerac pour l'année 1989.

Le cumul annuel des précipitations est de 505 mm d'eau. La quantité d'eau extraite du sol est donc pour l'année 1989 de 357 mm. Si l'on s'intéresse au flux quotidien : ETP - P, on observe pour les années 1989 à 1994 les données de la figure 5.7. Cette courbe fait apparaître deux phénomènes ou deux types de sécheresse :

- les sécheresses graves qui durent pratiquement 6 mois (de mai à décembre) pour les années 89, 90 et 91, avec des nuances en intensité ;
- les années hydrologiques plus habituelles avec deux périodes sèches, la fin de l'hiver et l'été, et deux périodes plus humides, le printemps et le début de l'automne.

L'indice choisi, cumul annuel de l'ETP - P traduit ces phénomènes.

station de Bergerac  
année 1989

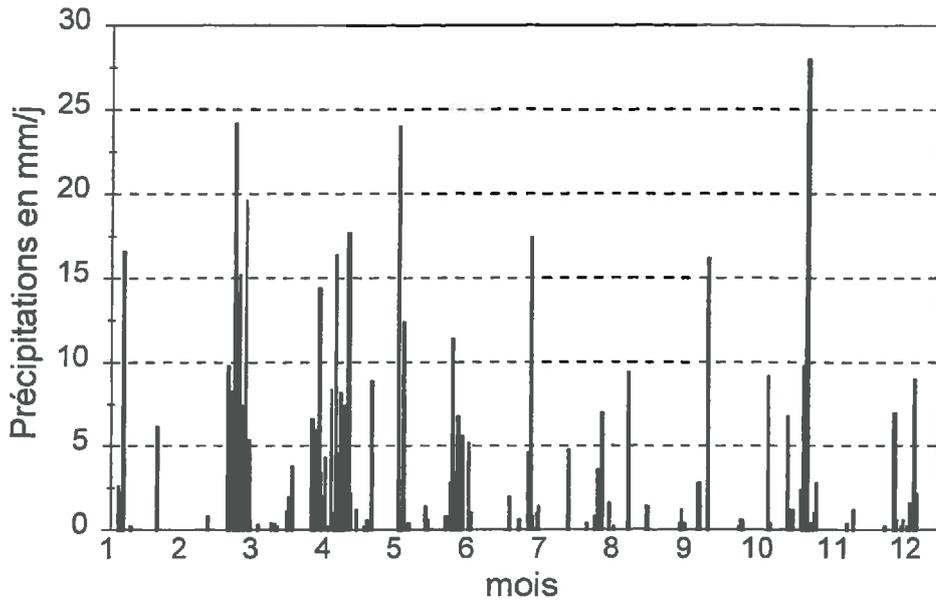


Figure 5. 6 : Précipitation à Bergerac pour l'année 1989

Station de Bergerac

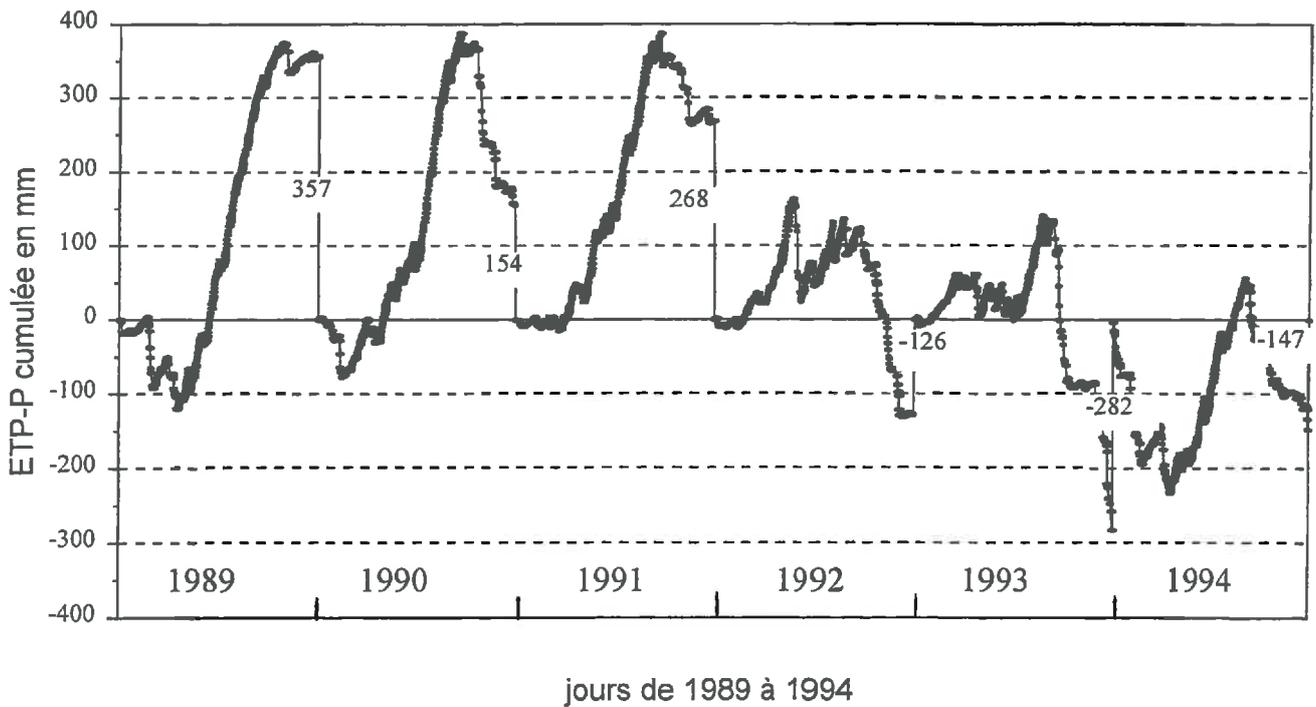


Figure 5. 7 : Flux hydrique journalier de 1989 à 1994 à Bergerac

Si l'on compare l'indice de sécheresse adopté à l'indice de gel, on remarque que dans le cas de l'indice de gel, on faisait le cumul de la quantité de "chaleur" entre les minimums et maximums locaux de la courbe.

Notre choix est différent puisque le sol possède une réserve hydrique et ainsi la valeur instantanée du flux surestime, à notre avis, l'état de sécheresse. Le choix de la valeur cumulée annuelle rend mieux compte des problèmes relevés sur les sols.

Ainsi l'indice de sécheresse annuel à Bergerac pour les années 1989 à 1994 est respectivement égal à 357, 154, 268, -126, -282, et -147 mm.J.

#### 1.2.4. Performance de l'indice

Nous allons essayer d'analyser la performance de cet indice vis à vis de la réalité météorologique et des autres indices présentés au paragraphe 1, à la station de Bergerac et sur une période de 65 années. Nous insérons donc au tableau 5.5 les 2 colonnes présentant respectivement, les valeurs de l'ETP Penman - les précipitations et l'état de sécheresse correspondant. On notera toutefois que du fait de l'absence de certaines données météorologiques, l'ETP est en fait calculée avec la formule de Thornwaithe et ajustée par un coefficient multiplicatif à celle de Penman. L'état de sécheresse est supposé moyen [2] pour des valeurs de l'indice comprises entre 150 et 200 et extrême [1] au delà de 200. Ces bornes correspondent respectivement aux indices de période de retour 5 ans et 10 ans (cf. figure 5.24).

On remarque sur le tableau 5.6 que la célèbre sécheresse de 1976 n'est pas réellement bien révélée par ce nouvel indice ETP-P. En effet, c'est une sécheresse essentiellement hivernale avec un déficit pluviométrique important. Or, l'hiver, l'évapotranspiration potentielle est faible et cela explique partiellement que la différence ETP-P ne soit pas très forte.

En revanche, la sécheresse de 1987 est bien marquée par ce nouvel indice comme par le PDSI qui la révèle avec un certain retard. Ce phénomène est également visible pour les sécheresses plus anciennes comme celles de 1948-1949, 1953-1954, 1956 et 1967, pour lesquelles ce nouvel indice est pertinent alors que le PDSI les révèle avec un décalage de quelques mois.

On peut conclure que cet indice n'est pas parfait puisqu'il omet de révéler certaines sécheresses, comme les sécheresses par déficit pluviométrique mais qu'il est globalement satisfaisant pour notre étude puisqu'il donne des résultats voisins de ceux du PDSI. On notera que son calcul est plus simple que celui du PDSI et qu'il est en liaison directe avec le flux hydrique.

Afin d'appliquer des sécheresses correspondantes à cet indice à des exemples de couverture, nous avons réalisé un modèle numérique de transfert hydrique.

Tableau 5. 6 : Pertinence du nouvel indice de sécheresse

Année	rP(%)	Etat	rAI (%)	Etat	SAI	Etat	PDI1	Etat	ETP/P	Etat	PDSI	Etat	ETP-P	Etat
1930	82.6		-17.4		-0.3		0.40		2.3		3.27		-83.7	
1931	146.0		46.0		0.7		-1.18		1.2		3.27		-179.1	
1932	148.3		48.3		0.8		-1.15		1.2		3.16		-42.6	
1933	91.4		-8.6		-0.1		0.88		6.5	1	0.35		167.2	2
1934	111.4		11.4		0.2		0.45		2.1		-0.87		-118.8	
1935	128.4		28.4		0.5		-0.33		1.4		2.25		-256.2	
1936	90.9		-9.1		-0.2		0.02		2.4		2.98		82.2	
1937	93.2		-6.9		-0.1		0.45		2.4		-0.01		-176.5	
1938	109.0		9.0		0.1		-0.25		8.1	1	0.53		53.3	
1939	88.8		-11.3		-0.2		-0.38		1.9		1.75		-42.4	
1940	102.7		2.7		0.1		-0.25		2.2		0.8		-69	
1941	141.6		41.6		0.7		-1.08		1.1		2.92		-135	
1942	98.4		-1.6		-0.1		0.32		1.6		1.19		148.5	
1943	87.5		-12.5		-0.3		1.20	2	2.3		-2.66	2	90.1	
1944	91.4		-8.6		-0.2		0.60		2.3		-1.91		11.6	
1945	78.6		-21.4	2	-0.4		1.38	2	2.3		-0.04		167.6	2
1946	90.4		-9.7		-0.1		0.13		2.5		-1.32		64.1	
1947	93.4		-6.6		-0.2		1.73	1	2.8	2	-0.5		93.6	
1948	85.9		-14.1		-0.2		0.33		2.4		-1.41		211.7	1
1949	68.6	2	-31.4	1	-0.5		1.75	1	10.7	1	-5.69	1	209.1	1
1950	85.0		-15.0		-0.2		0.68		3.8	1	-2.48	2	46.6	
1951	102.2		2.2		0.1		-0.35		3.1	2	0.92		-59.8	
1952	63.9	2	-36.1	1	-0.6	2	1.35	2	10.3	1	-1.23		-33.8	
1953	103.5		3.5		0.0		-0.13		4.1	1	-0.12		277.3	1
1954	77.6		-22.4	2	-0.4		-0.37		2.0		-2.89	2	49.7	
1955	89.2		-10.8		-0.2		0.16		3.5	1	-1.08		46.1	
1956	87.7		-12.3		-0.2		-0.87		1.8		-2.38	2	202.9	1
1957	96.1		-4.0		-0.1		-0.85		6.0	1	-2.24	2	102.2	
1958	114.8		14.8		0.2		-0.23		1.4		-1.23		-29.3	
1959	107.5		7.5		0.1		0.51		2.8	2	0.23		-115.8	
1960	139.8		39.8		0.6		-0.80		1.3		2.5		-336.9	
1961	65.3	2	-34.8	1	-0.6		1.10	2	3.1	2	2.23		161	2
1962	72.5		-27.5	2	-0.4		0.10		5.1	1	-0.23		90.6	
1963	132.3		32.3		0.5		-1.11		2.1		0.6		-99.7	
1964	71.9		-28.1	2	-0.4		0.77		4.0	1	0.22		195.4	2
1965	103.9		3.9		0.1		-0.87		2.2		-1.56		-57.5	
1966	110.2		10.2		0.2		-0.28		1.8		1.8		-88.9	
1967	54.0	2	-46.0	1	-0.7	2	0.38		4.4	1	-0.02		176.6	2
1968	106.5		6.5		0.1		-0.60		1.6		-2.05	2	99.9	
1969	109.9		9.9		0.2		-0.55		3.1	2	-1.28		10.3	
1970	76.4		-23.6	2	-0.4		0.38		3.3	2	-0.09		103.1	
1971	161.5		61.5		1.1		-0.93		1.3		1.06		-150.3	
1972	89.6		-10.4		-0.3		-1.25		12.3	1	-0.17		73.5	
1973	106.8		6.8		0.2		-0.08		2.4		-0.25		26.1	
1974	81.7		-18.4		-0.3		-0.22		5.1	1	-0.6		43.1	
1975	86.3		-13.7		-0.3		-0.07		2.8	2	-0.68		108.7	

Année	rP(%)	Etat	rAI (%)	Etat	SAI	Etat	PDI1	Etat	ETP/P	Etat	PDSI	Etat	ETP-P	Etat
1976	100.8		0.8		-0.0		0.10		3.2	2	-3.18	2	-23.4	
1977	117.2		17.2		0.3		-1.48		2.4		2.4		-84.7	
1978	84.1		-15.9		-0.3		-0.93		2.0		1.26		42.3	
1979	93.3		-6.7		-0.1		-0.75		2.2		-0.19		-50.1	
1980	71.8		-28.2	2	-0.5		-0.38		2.6	2	-0.27		49.3	
1981	137.9		37.9		0.7		-0.85		1.3		0.31		-256	
1982	63.4	2	-36.6	1	-0.6	2	1.08	2	8.3	1	1.09		-52.9	
1983	84.7		-15.3		-0.2		0.90		3.0	2	2.32		139.8	
1984	110.5		10.5		0.2		-0.73		2.1		-0.03		-173	
1985	89.8		-10.3		-0.1		0.27		5.2	1	1.92		70.3	
1986	124.4		24.4		0.4		-0.58		3.6	1	1.45		-124.4	
1987	67.2	2	-32.8	1	-0.6		0.92		3.0	2	-2.9	2	150.1	2
1988	112.9		12.9		0.3		0.03		2.1		2.1		-128.2	
1989	87.1		-13.0		-0.2		1.08	2	2.5	2	-1.78		357	1
1990	103.2		3.2		0.1		0.63		2.5	2	-3.95	2	154.5	2
1991	105.2		5.2		0.1		0.25		1.8		-0.17		268.7	1
1992	133.8		33.8		0.5		-0.08		1.3		0.2		-126.9	
1993	162.4		62.4		1.0		-0.88		1.1		1.99		-282.6	
1994	138.8		38.8		0.7		-0.13		1.6		5.5		-147.2	
1995	88.0		-12.0		-0.3		0.80		2.7	2	2.33		-88.4	

## 2. Présentation du modèle hydrique

Suivant l'exemple de l'indice de gel et afin que les résultats de la modélisation soient indépendants du modèle, le modèle numérique choisi est le plus simple possible : le sol est mono-couche, le modèle est unidimensionnel.

### 2.1. Modèle numérique

Il s'agit donc de résoudre l'équation aux dérivées partielles de transfert hydrique en milieu non saturé en eau (équation de Richard). L'écoulement est choisi unidirectionnel (sur la verticale). Le paramètre  $z$  (profondeur en m) est choisi positif vers le bas.

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \cdot \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad [\text{éq. 1}]$$

avec  $C$  capacité capillaire en  $\text{m}^{-1}$

$$C = - \frac{d\theta}{d\psi}$$

$\theta$  teneur en eau volumique

$K$  conductivité hydraulique en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\Psi$  succion capillaire en m

Nous appliquerons la méthode des différences finies sur une petite portion de la verticale (entre les points  $z_{i-1}$ ,  $z_i$ ,  $z_{i+1}$ ) entre les instants  $(k \cdot \Delta t)$  et  $(k+1) \cdot \Delta t$ ) (cf. figure 5.6). Nous utiliserons la méthode de résolution implicite afin d'assurer la convergence des calculs.

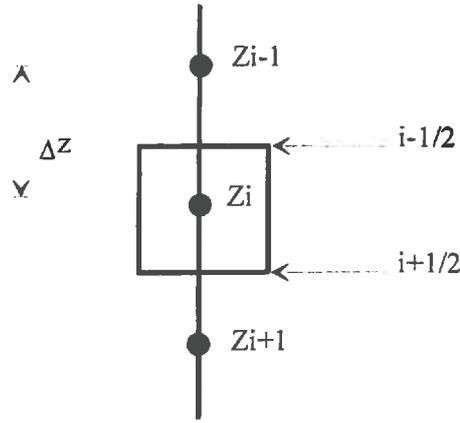


Figure 5. 8 : Portion verticale de sol

Le pas d'espace sur la verticale,  $\Delta z$  est pris constant car il n'est pas nécessaire d'optimiser le maillage pour des calculs unidimensionnels, les temps de calculs étant faibles. De même, le pas de temps des calculs sera constant et optimisé en fonction de la conductivité hydraulique.

L'équation 1 discrétisée s'écrit donc :

$$C_i^k \cdot \frac{\psi_i^{k+1} - \psi_i^k}{\Delta t} = \frac{K_{i+1/2}^k}{\Delta z^2} \cdot (\psi_{i+1}^{k+1} - \psi_i^{k+1}) - \frac{K_{i-1/2}^k}{\Delta z^2} \cdot (\psi_i^{k+1} - \psi_{i-1}^{k+1}) + \frac{K_{i+1/2}^k - K_{i-1/2}^k}{\Delta z} \quad [\text{éq. 2}]$$

$$\text{avec } K_{i+1/2}^k = 2 \cdot \frac{K_i^k \cdot K_{i+1}^k}{K_i^k + K_{i+1}^k} \text{ et } K_{i-1/2}^k = 2 \cdot \frac{K_i^k \cdot K_{i-1}^k}{K_i^k + K_{i-1}^k}$$

(la moyenne harmonique est choisie car les cellules sont en série).

Cette équation relie la succion en un point à l'instant  $k$  aux valeurs de la succion à l'instant  $k+1$  en ce point et aux points voisins et des paramètres physiques : conductivité et capacité à l'instant  $k$ , ceci sur chaque point de la verticale.

$$\psi_i^k = -\frac{K_{i-1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_i^k} \cdot (\psi_{i-1}^{k+1}) + \left( 1 + \frac{(K_{i+1/2}^k + K_{i-1/2}^k) \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_i^k} \right) \cdot (\psi_i^{k+1}) - \frac{K_{i+1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_i^k} \cdot (\psi_{i+1}^{k+1}) - \frac{K_{i+1/2}^k - K_{i-1/2}^k}{\Delta z \cdot C_i^k} \cdot \Delta t$$

Soit en chaque point de la verticale à chaque instant :

$$\psi_i^k = \alpha_i^k \cdot \psi_{i-1}^{k+1} + \beta_i^k \cdot \psi_i^{k+1} + \gamma_i^k \cdot \psi_{i+1}^{k+1} + \rho_i^k$$

$$A^k \cdot \Psi^{k+1} = \Psi^k - \rho^k$$

La matrice des coefficients,  $A^k$  étant tri-diagonale, la résolution du système peut se faire en utilisant l'algorithme de Thomas. Le programme du modèle est écrit en Fortran 77.

## 2.2. Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle sont fondamentales. Ce sont les caractéristiques physiques du sol :

- la relation succion - teneur en eau et la relation qui en découle entre la capacité capillaire et la succion ;
- la relation entre la conductivité hydraulique et la succion.

Nous sommes conscients que ces caractéristiques dépendent de nombreux paramètres dont l'histoire du sol mais nous supposons que le comportement du sol vis à vis de l'eau est déterminé au début de l'étude. Ceci peut être valable dans le cadre des couvertures de stockage de déchets, car on peut penser qu'une fois la couverture mise en place et stabilisée, le sol ne devrait pas subir de compaction ou de tassements trop importants.

Nous négligerons également l'effet d'hystérésis qui apparaît généralement sur les courbes succion - teneur en eau du type de celle de la figure 5.7, puisque cette relation n'est pas univoque mais qu'elle dépend de l'état hydrique de départ (sol saturé ou sol sec). Ceci est partiellement justifié par le fait que nous étudions le comportement du sol essentiellement en cours de dessiccation.

- Calcul de la teneur en eau volumique ( $\theta$ , inférieure à 1) en fonction de la succion ( $\Psi$ , en m)

$$\theta = \theta_{ir} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{ir}}{\left(1 + (a \cdot \psi)^b\right)^c}$$

avec  $c = 1-1/b$ ,  $\theta_{sat}$  est la teneur en eau à saturation et  $\theta_{ir}$  est la teneur en eau irréductible.

- Calcul de la capacité capillaire ( $C$ , en  $m^{-1}$ ) en fonction de la succion ( $\Psi$ , en m)

$$C = -\frac{d\theta}{d\psi} \text{ soit dans ce cas}$$

$$C = \frac{(\theta_{sat} - \theta_{ir}) \cdot (b-1) \cdot a^b \cdot \psi^{b-1}}{\left(1 + (a \cdot \psi)^b\right)^{\left(2-\frac{1}{b}\right)}}$$

- Calcul de la conductivité hydraulique ( $K$ , en  $m \cdot s^{-1}$ ) en fonction de la succion ( $\Psi$ , en m)

$$K = K_{sat} \cdot \frac{A}{A + \psi^B}$$

avec  $K_{sat}$  conductivité du sol à saturation.

Pour un sol limoneux les coefficients peuvent être par exemple les suivants :

a	0,1
b	2
$\theta_{sat}$	0,35
$\theta_{ir}$	0,015
A	100
B	2,607
$K_{sat}$	$1,1 \cdot 10^{-6} m \cdot s^{-1}$

Les courbes obtenues sont alors celles des figures 5.9, 5.10 et 5.11.

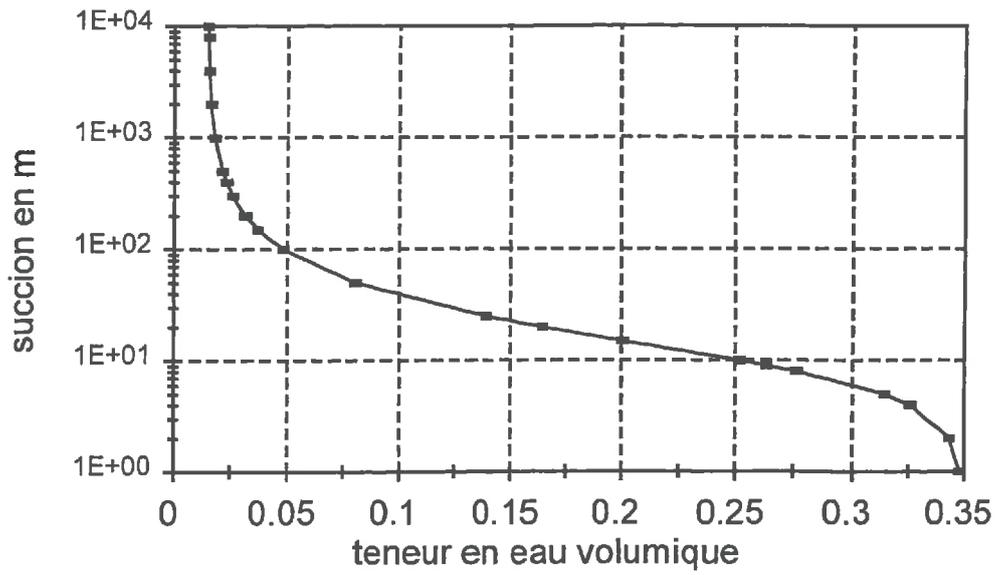


Figure 5. 9 : Relation suction - teneur en eau du sol type

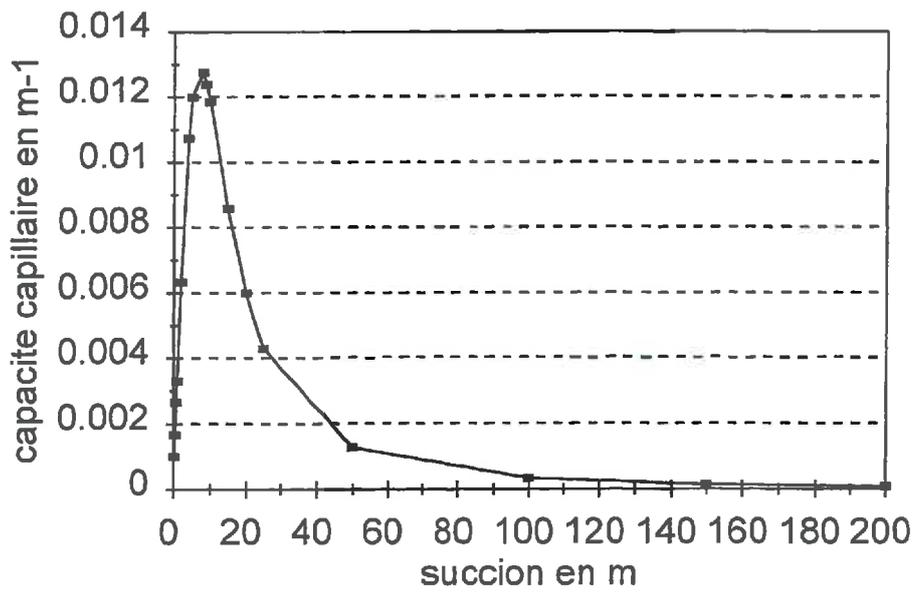


Figure 5. 10 : Relation capacité capillaire - suction du sol type

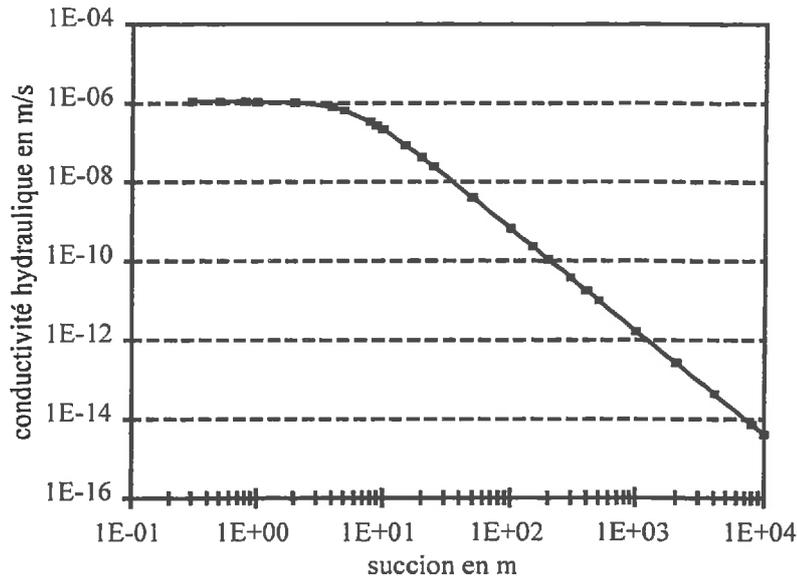


Figure 5.11 : Relation conductivité - succion pour le sol type

### 2.3. Conditions aux limites

Nous attacherons beaucoup d'importance aux conditions aux limites car elles déterminent souvent une grande partie des résultats des calculs.

#### 2.3.1. Limite supérieure du modèle

On impose un flux sur la limite supérieure (nœud fictif 1-1/2),  $F_0$  (en  $m \cdot s^{-1}$ ), qui est positif pour l'infiltration et négatif pour l'évaporation. Donc l'équation 2 devient pour  $i=1$  (premier point du sol) :

$$C_1^k \cdot \frac{\psi_1^{k+1} - \psi_1^k}{\Delta t} = \frac{K_{1+1/2}^k}{\Delta z^2} \cdot (\psi_2^{k+1} - \psi_1^{k+1}) - \frac{F_0}{\Delta z} + \frac{K_{1+1/2}^k}{\Delta z}$$

$$\psi_1^k = \left( 1 + \frac{(K_{1+1/2}^k) \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_1^k} \right) \cdot \psi_1^{k+1} - \frac{K_{1+1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_1^k} \cdot \psi_2^{k+1} + \frac{-K_{1+1/2}^k + F_0}{\Delta z \cdot C_1^k} \cdot \Delta t$$

$$\psi_1^k = \beta_1^k \cdot \psi_1^{k+1} + \gamma_1^k \cdot \psi_2^{k+1} + \rho_1^k$$

#### 2.3.2. Limite inférieure du modèle

On peut imposer différents types de conditions pour la limite inférieure portant sur la succion ou sur le flux. Nous présentons ci-dessous le cas où la succion est imposée, le cas du flux imposé est présenté au paragraphe 2.5.2.

On impose la teneur en eau, donc la succion  $\Psi'_{imp}$ , en m, d'où la conductivité  $K_{imp}$ , en  $m \cdot s^{-1}$ , sur le dernier nœud fictif  $n+1$ . L'équation 2 devient pour  $i=n$  (dernier point du sol) :

$$\psi_n^k = -\frac{K_{n-1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_n^k} \cdot \psi_{n-1}^{k+1} + \left( 1 + \frac{(K_{n+1/2}^k + K_{n-1/2}^k) \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_n^k} \right) \cdot \psi_n^{k+1} - \frac{K_{n+1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_n^k} \cdot \psi_{imp} - \frac{K_{n+1/2}^k - K_{n-1/2}^k}{\Delta z \cdot C_n^k} \cdot \Delta t$$

$$\text{avec } K_{n+1/2}^k = 2 \cdot \frac{K_n^k \cdot K_{imp}^k}{K_n^k + K_{imp}^k}$$

$$\psi_n^k = \alpha_n^k \cdot \psi_{n-1}^{k+1} + \beta_n^k \cdot \psi_n^{k+1} + \rho_n^k$$

## 2.4. Validations numériques du modèle

Ces différents exercices nous permettront de vérifier la logique du programme mais aussi d'optimiser le pas d'espace et le pas de temps des calculs pour chaque type de sol.

### 2.4.1. Vérification numérique

Le bilan d'eau, nous permet de nous assurer que le programme respecte à tout instant le bilan volumique ou massique de l'eau contenue dans le sol.

\* le stock d'eau à l'instant t :  $V_{sto}(t)$

$$V_{sto}(t) = \int_0^{z_{max}} \theta(z, t) \cdot dz = \sum_{i=0}^n \theta_i(t) \Delta z$$

\* le volume arithmétique entré ou sorti à l'instant t par le sommet du modèle :  $V_{sup}(t)$   
(le volume est positif si l'eau entre dans le sol)

$$V_{sup}(t) = \int_{t_0}^t F_0(t) dt$$

\* le volume arithmétique entré ou sorti à l'instant t par la base du modèle :  $V_{inf}(t)$   
(le volume est positif si l'eau sort du modèle)

$$V_{inf}(t) = \int_{t_0}^t F_{z_{max}}(t) dt = \sum_k K_{n+1/2}^k \cdot \left( \frac{(\psi_{imp}^k - \psi_n^k)}{\Delta z} + 1 \right)$$

Cette formule s'applique dans le cas où la succion est imposée à la base du modèle. Si on impose un flux alors on utilisera la même formule que pour  $V_{sup}$ .

\* le bilan d'eau à l'instant t à comparer à 1 en valeur absolue :  $Bilan(t)$

$$Bilan(t) = \frac{V_{sto}(t) - V_{sto}(t_0) + V_{inf}(t)}{V_{sup}(t)}$$

ou, lorsque le flux à travers la limite supérieure est nul

$$Bilan(t) = \frac{V_{sto}(t) - V_{sto}(t_0)}{V_{inf}(t)}$$

### 2.4.2. Validation numérique

Cette validation va nous permettre de tester la stabilité du modèle et la logique des transferts hydriques.

#### 2.4.2.1. Test 1

##### Rééquilibrage d'un profil hydrique au dessus d'une nappe située à 5 m.

Le profil de succion initial est constant et égal à 2 m. Le flux à travers la limite supérieure est nul. A partir du premier pas de temps on impose à la base une succion de 0,1 m qui est voisine de la saturation dans notre cas. Les caractéristiques du sol utilisées dans les calculs sont celles présentées dans le modèle au paragraphe 2.2. Le pas de temps de calcul est de 1 heure. Le pas du maillage est de 0,17 m. Les résultats des calculs sont présentés dans la figure 5.12.

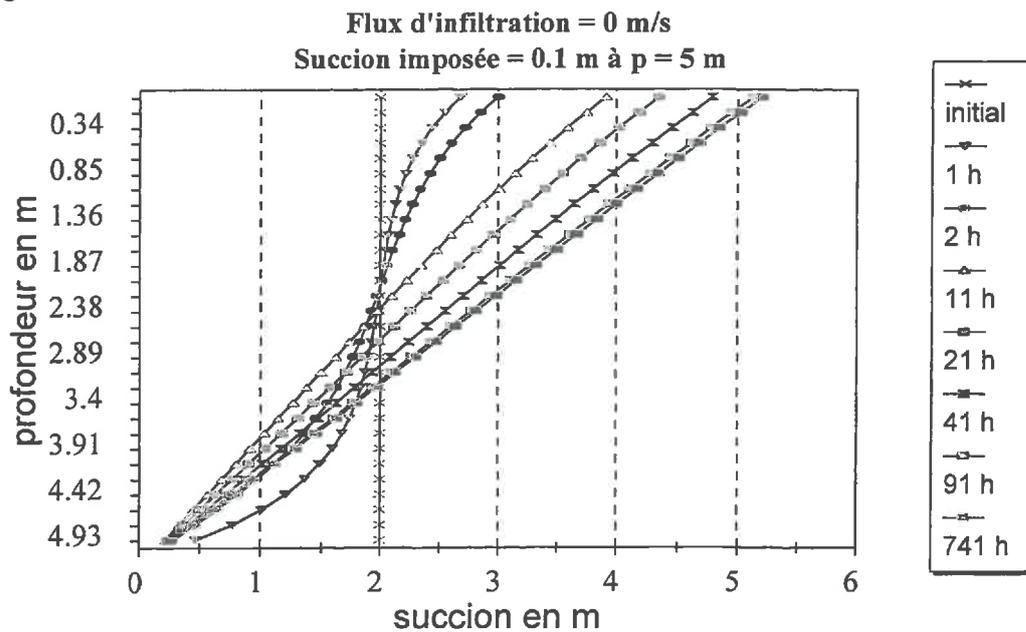


Figure 5.12 : Profil des succions dans le sol

##### Bilan de masse ou de volume

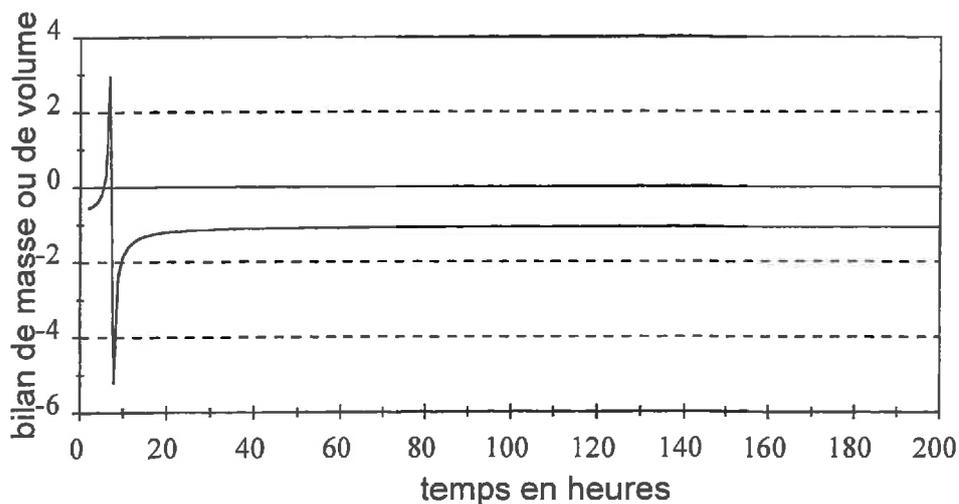


Figure 5.13 : Bilan hydrique du test 1

On constate un rééquilibrage assez rapide du profil des succions. Après 11 heures ou 11 calculs le profil est déjà partiellement à l'équilibre. La stabilité du programme est bonne car une fois l'équilibre atteint, les valeurs sont inchangées.

Le bilan d'eau est assez bon, puisque seuls les premiers calculs sont déséquilibrés.

#### 2.4.2.2. Test 2

##### Infiltration sur un profil d'équilibre au dessus d'une nappe située à 5 m de profondeur. (3 calculs)

Le profil de succion initial est un profil d'équilibre correspondant à 5 m de succion au sommet et la saturation à la base avec linéarité entre ses 2 points. Le flux d'infiltration ou d'évaporation,  $F_0(t)$ , à travers la limite supérieure ( $z=0$ ) est constant tout au long de la période testée.

Pour le premier calcul, on impose un flux d'infiltration de  $6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ . Pour le second calcul, on impose un flux d'infiltration de  $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  et dans le troisième on impose un flux d'évaporation de  $-6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ . On notera que le flux est inférieur, en valeur absolue, à la conductivité hydraulique du sol à saturation ( $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ ). Dans tous les cas, à partir du premier pas de temps on impose à la base une succion de 0,1 m qui est voisine de la saturation dans notre cas. Les caractéristiques du sol utilisées dans les calculs sont celles présentées dans le modèle au paragraphe 2.2. Le pas de temps de calcul est de 1 heure. Le pas de maillage est de 0,17 m. Les résultats des calculs sont présentés aux figures 5.14, 5.15 et 5.16.

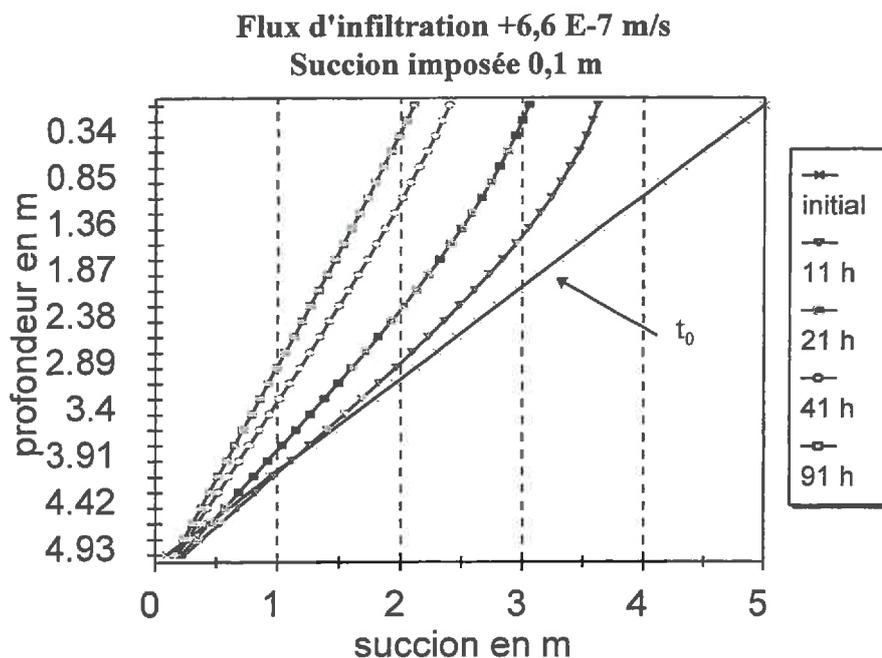
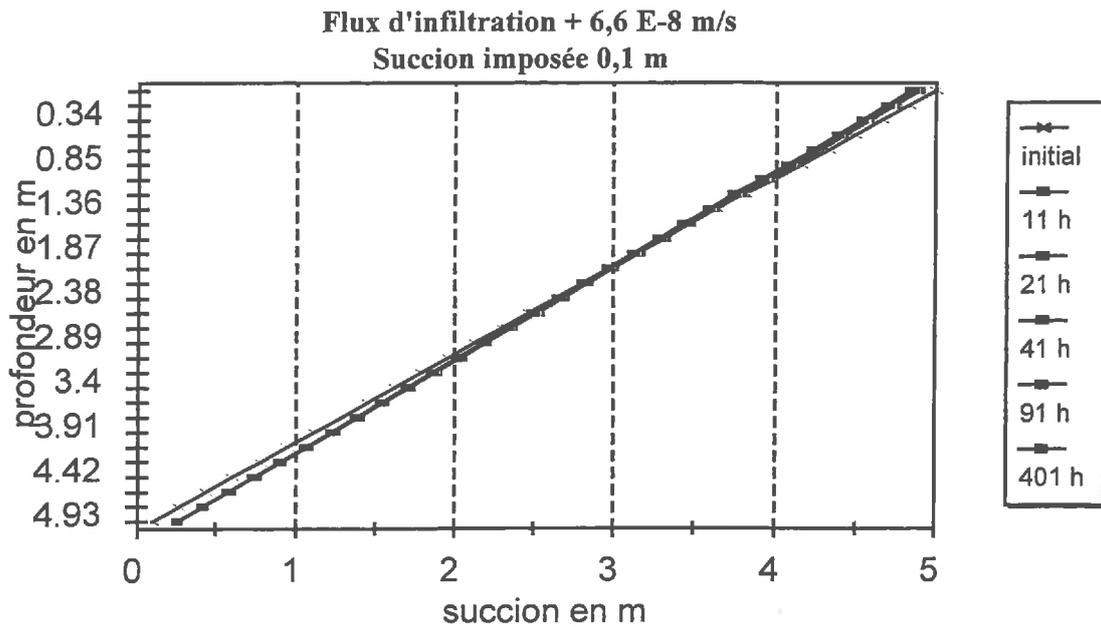
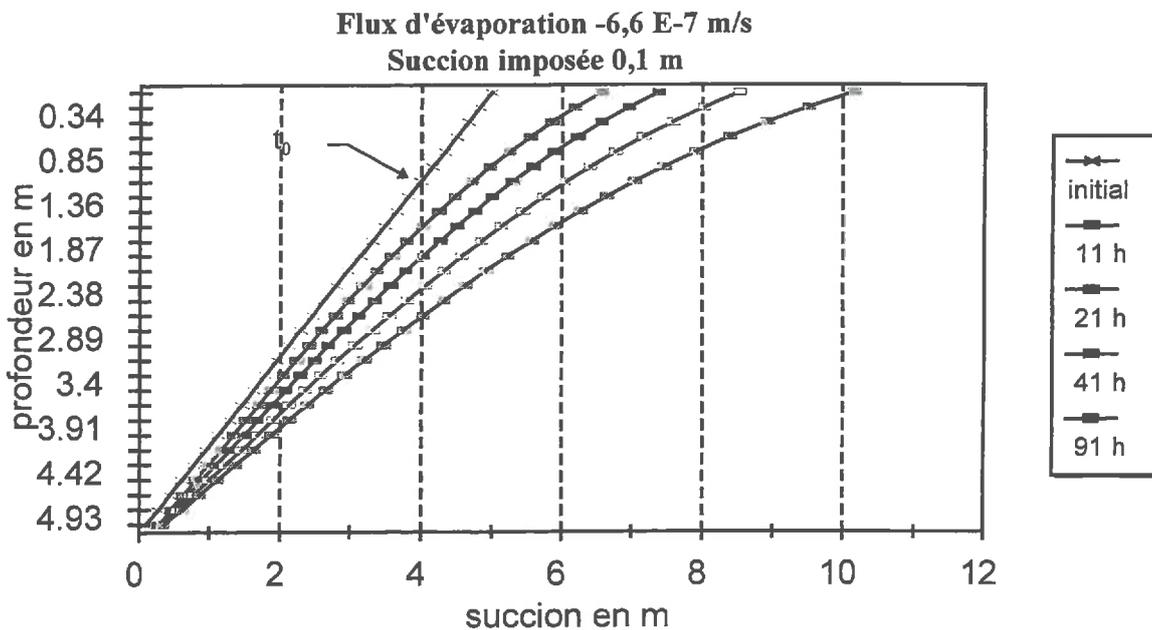


Figure 5. 14 : Profil des succions test 2 - infiltration forte



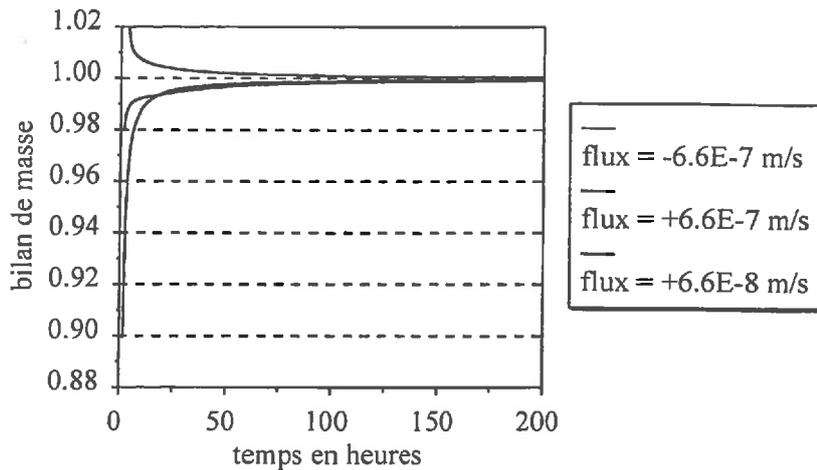
**Figure 5. 15 : Profil des succions test 2 - infiltration faible**



**Figure 5. 16 : Profil des succions test 2 - évaporation**

Les résultats de ces 3 calculs sont cohérents : si l'on impose une infiltration, les teneurs en eau augmentent ; si on impose une évaporation, les teneurs en eau diminuent. De plus les proportions sont vérifiées : plus l'infiltration est importante, plus vite les teneurs en eau augmentent. Lors de ces 3 calculs, les bilans d'eau sont stables et proches de l'unité (cf. figure 5.17).

## Bilan de masse



**Figure 5. 17 : Bilans hydriques du test 2**

On peut donc conclure que le modèle et le programme proposés sont numériquement valides. Nous allons maintenant essayer de valider expérimentalement ce modèle de transferts hydriques et nous l'appliquons ensuite aux calculs liés à l'indice de sécheresse.

### 2.5. Validation expérimentale du modèle

Les données utilisées sont issues de la thèse de Gabriel de los Cobos (1994) présentée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse. Il a en effet étudié la dessiccation d'une boue argileuse. Cette boue est une boue issue du lavage de granulats alluvionnaires dans la gravière de Giobellina à Berolle la Combèze (NW de Lausanne en Suisse). Cette boue est parfaitement caractérisée : granulométrie, minéralogie, caractéristiques mécaniques et hydriques (perméabilité, courbe de succion - teneur en eau). Son installation lui a permis de suivre la teneur en eau d'une cuve de boue initialement à saturation et qui est asséchée par le sommet.

#### 2.5.1. Caractéristiques du matériaux

Nous avons modifié notre modèle numérique afin d'utiliser les formules préconisées par de Los Cobos qui sont en fait les formules de Van Genuchten.

- Calcul de la conductivité hydraulique ( $K$ , en  $m \cdot s^{-1}$ ) en fonction de la succion ( $\Psi$ , en m)

$$K = K_{sat} \cdot \theta_p^{\frac{1}{2}} \cdot \left( 1 - \left( 1 - \theta_p^{\frac{1}{c}} \right)^c \right)^2$$

$$\text{avec } \theta_p = \frac{\theta - \theta_{ir}}{\theta_{sat} - \theta_{ir}} \text{ et } c = 1 - 1/b$$

Pour un sol « Limon 01 Giobellina » utilisé par de Los Cobos et pour suivre au mieux la courbe expérimentale succion - teneur en eau volumique présentée dans sa thèse les coefficients suivant ont été choisis :

a	0,25
b	1,4
$\theta_{sat}$	0,45
$\theta_{ir}$	0,03

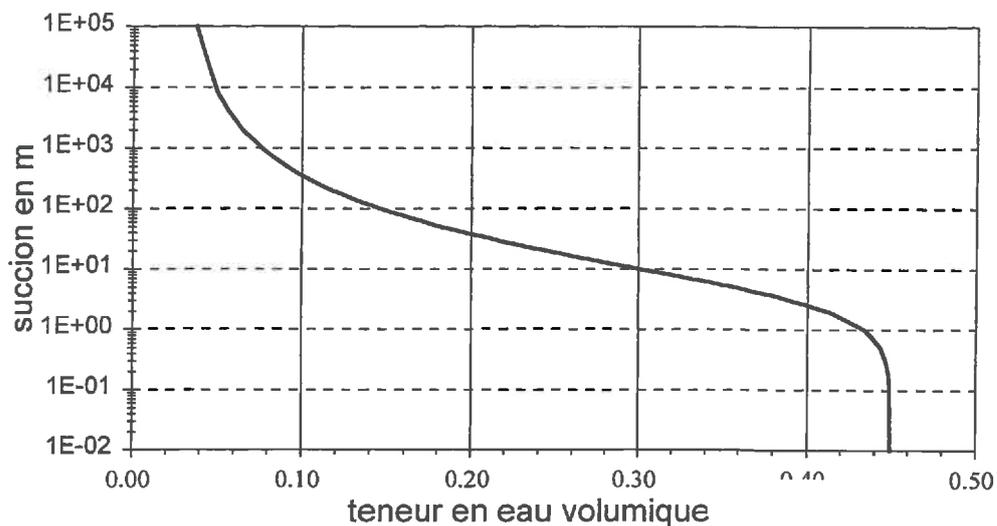


Figure 5. 18 : Courbe succion - teneur en eau de la boue

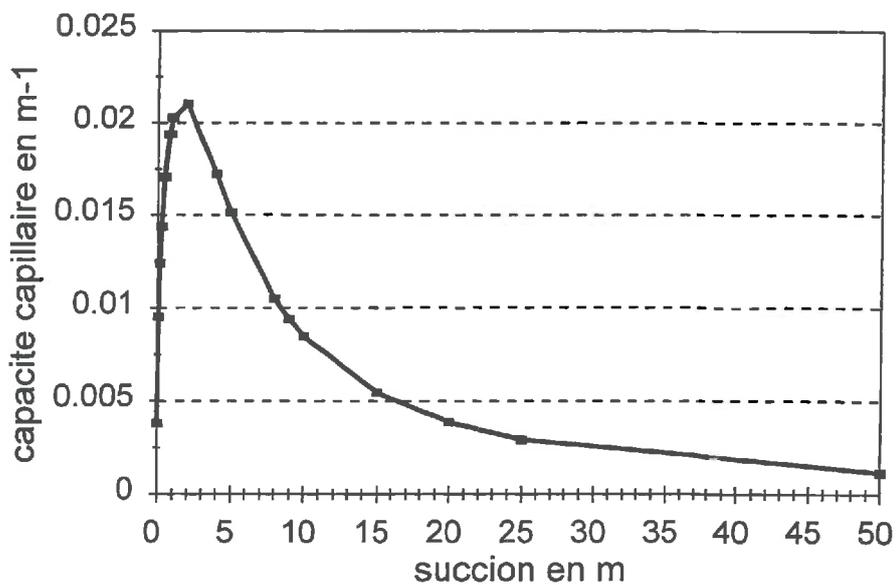
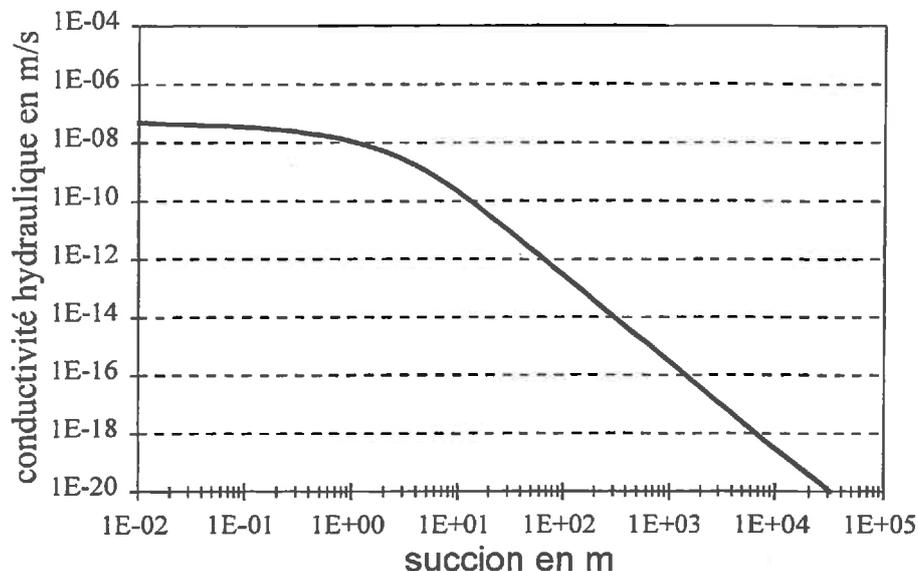


Figure 5. 19 : Courbe capacité capillaire - succion de la boue

La conductivité hydraulique de la boue à saturation a été déduite de plusieurs constatations. Car selon la méthode de mesure la perméabilité varie de  $1.10^{-9}$  à  $1.10^{-7}$   $m.s^{-1}$ . Sur les petits échantillons comprimés, la conductivité obtenue à l'œdomètre ou à la cellule triaxiale, est très faible :  $1,5.10^{-9}$   $m.s^{-1}$  en moyenne. Au perméamètre cette conductivité est d'environ  $7.10^{-8}$   $m.s^{-1}$ . Lors de sa modélisation d'un barrage en boue, il conclut à partir des débits que la conductivité est de l'ordre de  $9.10^{-7}$   $m.s^{-1}$ . Donc au niveau de la cuve nous avons choisi une valeur intermédiaire de  $6.10^{-8}$   $m.s^{-1}$  qui donne de bons résultats.



**Figure 5. 20 : Courbe conductivité - succion de la boue**

### 2.5.2. Choix du volume représentatif et des conditions aux limites.

Le volume représentatif est le volume de la cuve qui fait 80 cm de hauteur. On répartit 80 points de calcul soit un pas de maillage de 0,01 m. Le pas de temps de calcul est de 1 heure. Lors de son expérimentation, de Los Cobos constate que la teneur en eau volumique de la boue ne varie pas significativement pendant les 3 premiers mois car la boue se tasse. Nous avons donc simulé l'assèchement de la boue à partir du 89<sup>ème</sup> jour ; donc  $279-89 = 190$  jours soit  $190 \times 24 = 4560$  heures ou pas de temps.

#### Limite supérieure :

On impose un flux sur la limite supérieure,  $F_0$ , en  $m.s^{-1}$ , qui est positif pour l'infiltration et négatif pour l'évaporation. L'évaporation dans la halle est d'environ  $0,5$   $l/(24h.m^2)$  soit  $0,5mm/(24 h)$  soit  $5,78.10^{-9}$   $m.s^{-1}$ . Donc  $F_0$  est égal à  $-5,78.10^{-9}$   $m.s^{-1}$ .

#### Limite inférieure :

On impose le flux  $F_i$ , en  $m.s^{-1}$  est positif si de l'eau sort du système et négatif si l'eau y entre. L'équation 2 devient pour  $i = n$  (dernier point du sol) :

$$C_n^k \cdot \frac{\psi_n^{k+1} - \psi_n^k}{\Delta t} = -\frac{K_{n-1/2}^k}{\Delta z^2} \cdot (\psi_n^{k+1} - \psi_{n-1}^{k+1}) - \frac{K_{n-1/2}^k}{\Delta z} + \frac{F_1}{\Delta z}$$

D'où

$$\psi_n^k = -\frac{K_{n-1/2}^k \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_n^k} \cdot \psi_{n-1}^{k+1} + \left(1 + \frac{(K_{n+1/2}^k + K_{n-1/2}^k) \cdot \Delta t}{\Delta z^2 \cdot C_n^k}\right) \cdot \psi_n^{k+1} - \frac{F_1 - K_{n-1/2}^k}{\Delta z \cdot C_n^k} \cdot \Delta t$$

$$\psi_n^k = \alpha_n^k \cdot \psi_{n-1}^{k+1} + \beta_n^k \cdot \psi_n^{k+1} + \rho_n^k$$

Dans le cas expérimental le flux F1 est nul, puisque le fond de la cuve est étanche.

### 2.5.3. Comparaison des résultats

Les résultats de la modélisation de la figure 5.22 sont à comparer avec les résultats expérimentaux de de Los Cobos présentés à la figure 5.23.

On voit une très bonne similitude des courbes qui sont plus régulières dans le modèle que dans l'expérience mais qui ont globalement une signification identique. On note une meilleure correspondance pour le profil du 230<sup>e</sup> jour. Les imperfections sont probablement liées au fait que le flux réel d'évaporation n'est pas constant dans le temps. La valeur de flux donnée par de Los Cobos est en effet une moyenne.

Le bilan de masse de notre simulation est également très bon car toujours très proche de 1.

Nous en déduisons que le modèle numérique présenté peut reproduire des résultats expérimentaux et donc, en choisissant des données d'entrées satisfaisantes, les simuler.

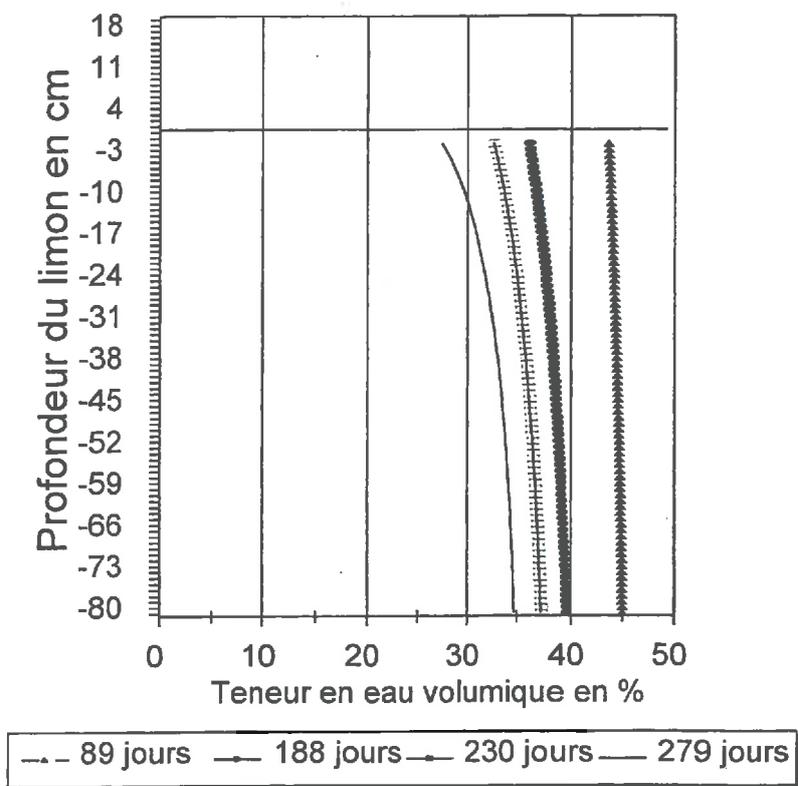


Figure 5. 21 : Profils des teneurs en eau calculés par le modèle

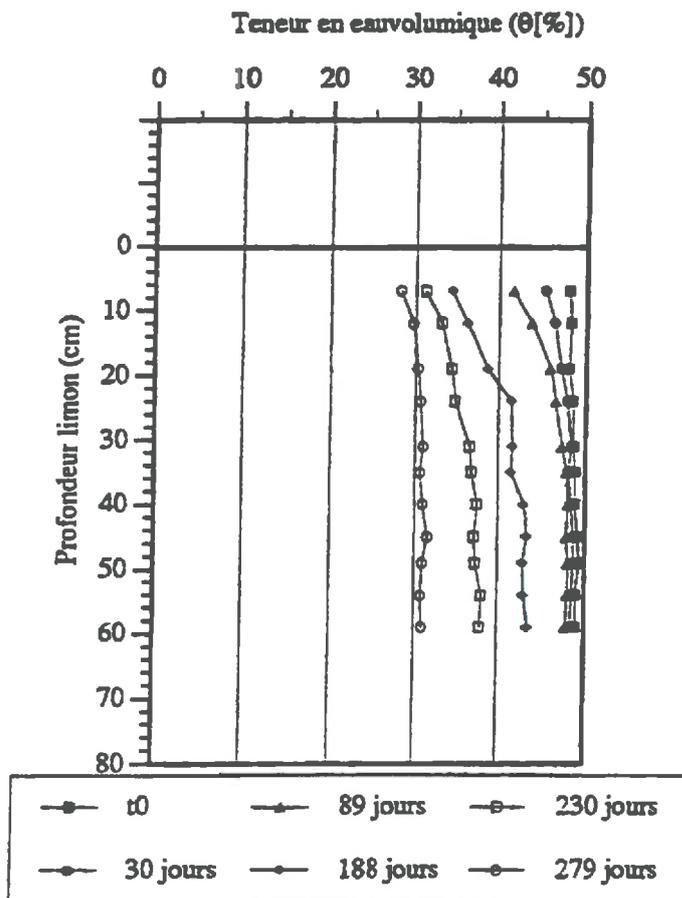


Figure 5. 22 : Profils des teneurs en eau mesurées par de Los Cobos

### 3. Application

#### 3.1. Prévision de l'indice des sécheresses extrêmes

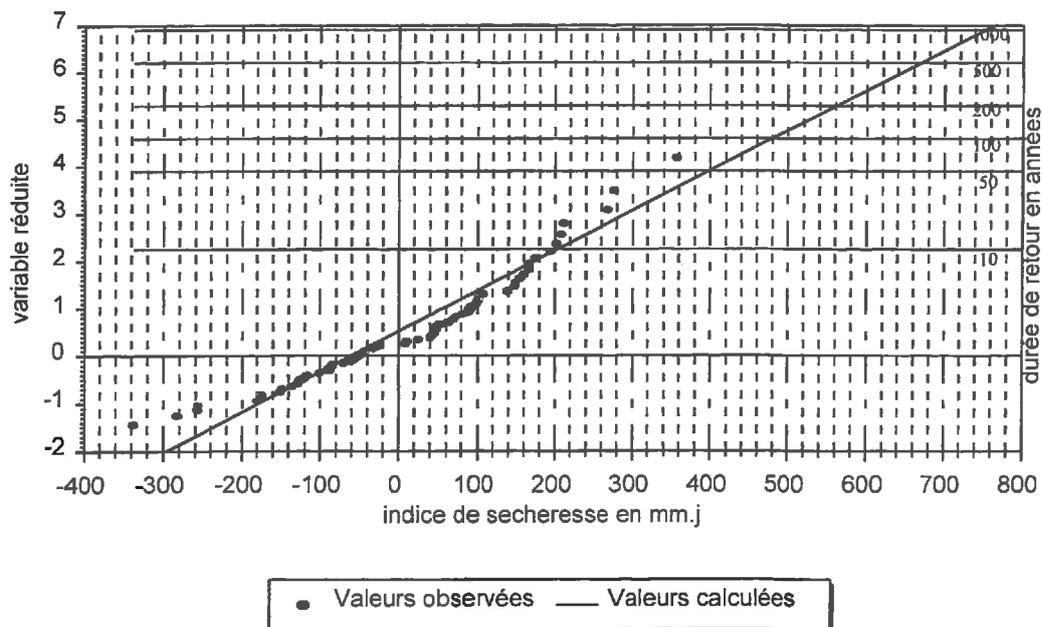
A partir de l'indice des sécheresses actuelles nous allons estimer les indices des sécheresses plus sévères de période de retour centennale ou millennale par ajustement statistique et extrapolation. Nous utiliserons la loi de Gumbel et les abaques de Bernier pour calculer l'aléa statistique. La figure 5.24 présente l'ajustement des valeurs de l'indice de sécheresse à la loi de Gumbel. Cet ajustement n'est pas très bon sur le plan statistique, toutefois nous utiliserons les valeurs décennales, centennales et millennales pour la suite de nos calculs.

**Tableau 5. 7 : Intervalle de confiance à 70 % d'après l'abaque de Bernier**

Durée de retour en année	Indice en mm.j	C2	C1	Borne sup. de l'indice	Borne inf. de l'indice
1000	750	0.8	0.67	857	659
100	480	0.52	0.45	549	419
10	200	0.3	0.22	240	170

Ceci est difficilement vérifiable, toutefois les chroniques rapportent des étés particulièrement chauds et secs qui pourraient correspondre à ces estimations. (cf. annexe n°3)

**Ajustement de l'indice de sécheresse  
à Bergerac à une loi de Gumbel  
sur la période 1930 - 1995**



**Figure 5. 23 : Ajustement des indices de sécheresse à Bergerac**

### 3.2. Simulation de ces sécheresses sur des sols

A partir de l'indice de sécheresse déterminé, on peut soit restituer une année ayant cet indice, soit calculer le flux moyen annuel de cette année sèche et l'appliquer à notre modèle de sol.

La première méthode ressemble à celle utilisée pour les averses. Toutefois les sécheresses sont des phénomènes plus complexes que les averses. En effet, alors que pour les averses nous disposons de hyétogrammes caractéristiques d'une station ou d'une région (orage orographique, orage de convection, ...), pour les sécheresses l'allure de la courbe des flux hydriques est plus variable (cf. figure 5.7). De plus, le flux hydrique quotidien imposé au modèle de calcul aura alors une grande variation par rapport au pas de temps de calcul ce qui compliquera l'analyse des résultats.

La deuxième méthode est plus stable et peut être plus réaliste vis à vis du comportement du sol à une profondeur de quelques centimètres. A partir des indices de sécheresses extrapolées, (750, 480 et 200 mm.j) on calcule des flux moyens annuels instantanés ( $2,4 \cdot 10^{-8}$ ,  $6,3 \cdot 10^{-9}$  et  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ ).

Par exemple pour la sécheresse millénaire, le calcul est le suivant :

$$750 \text{ mm.j} / (365 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} \times 1000) = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$$

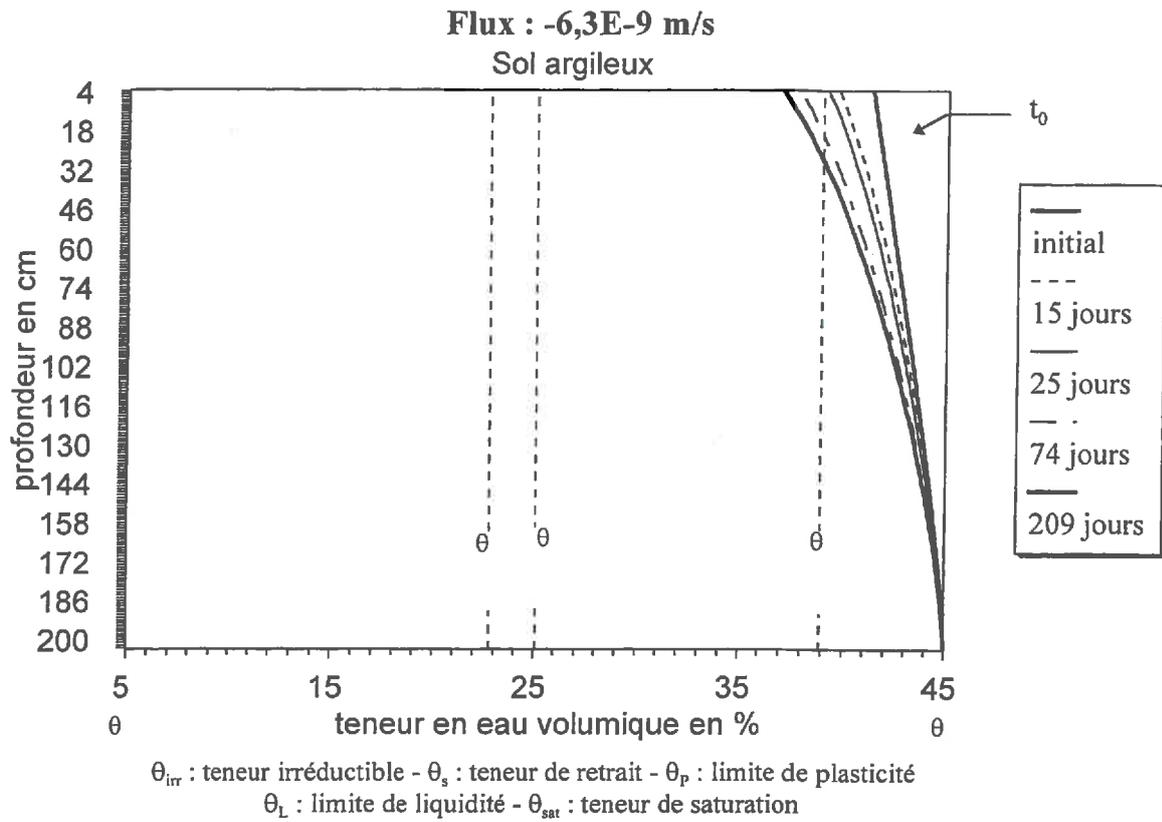
Ces flux sont alors appliqués au modèle de sol.

#### 3.2.1. Simulation de ces sécheresses sur un sol argileux

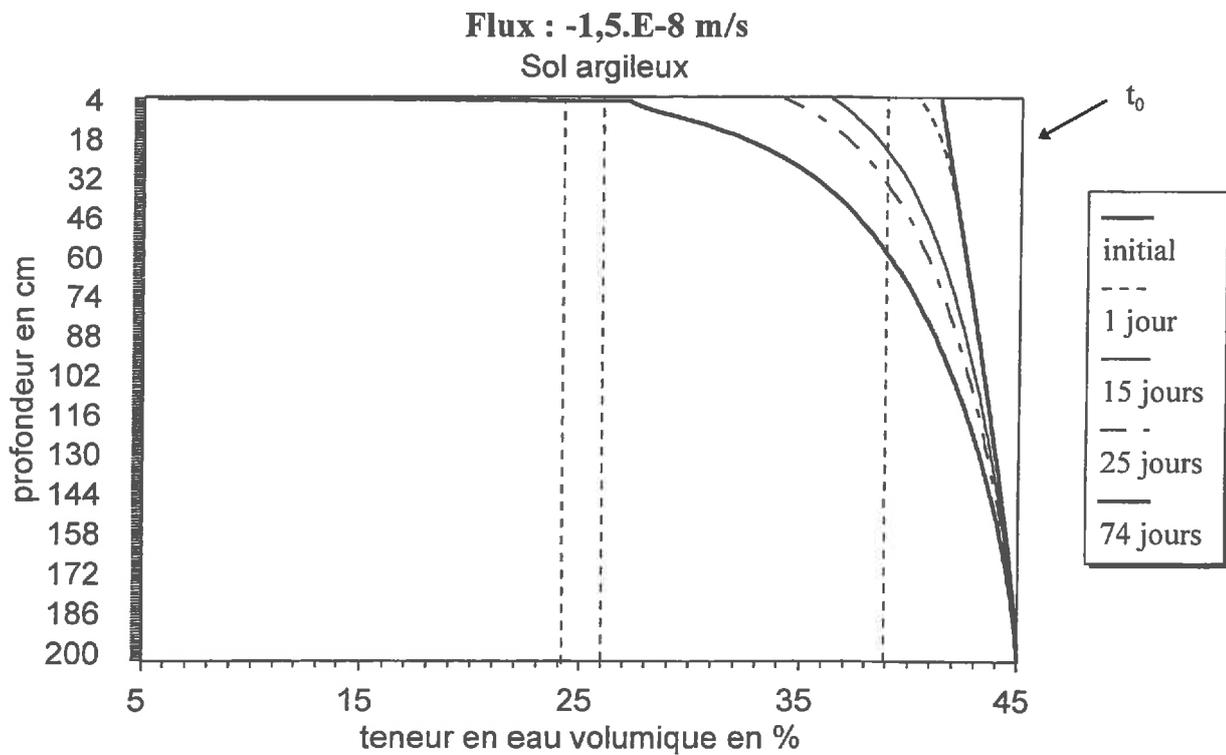
Les caractéristiques du sol utilisées sont celles du limon argileux de de Los Cobos. Le volume représentatif choisi est une couche de 2 m d'épaisseur. Ce volume est à l'équilibre hydrique initialement avec une succion linéaire de 2 m en surface et voisine de 0 à la base. Les conditions aux limites sont : le flux d'évaporation imposé en surface et à la base une succion imposée voisine de 0 (cela équivaut à la saturation). Le pas de temps de calcul est de 1 heure et le pas du maillage est de 1 cm. Nous pouvons observer, sur les figures 5.25, 5.26 et 5.27 l'évolution de la teneur en eau volumique du sol en fonction du temps et de la profondeur.

On remarque que plus le flux est important, plus la teneur en eau en un point, pour un instant donné est faible.

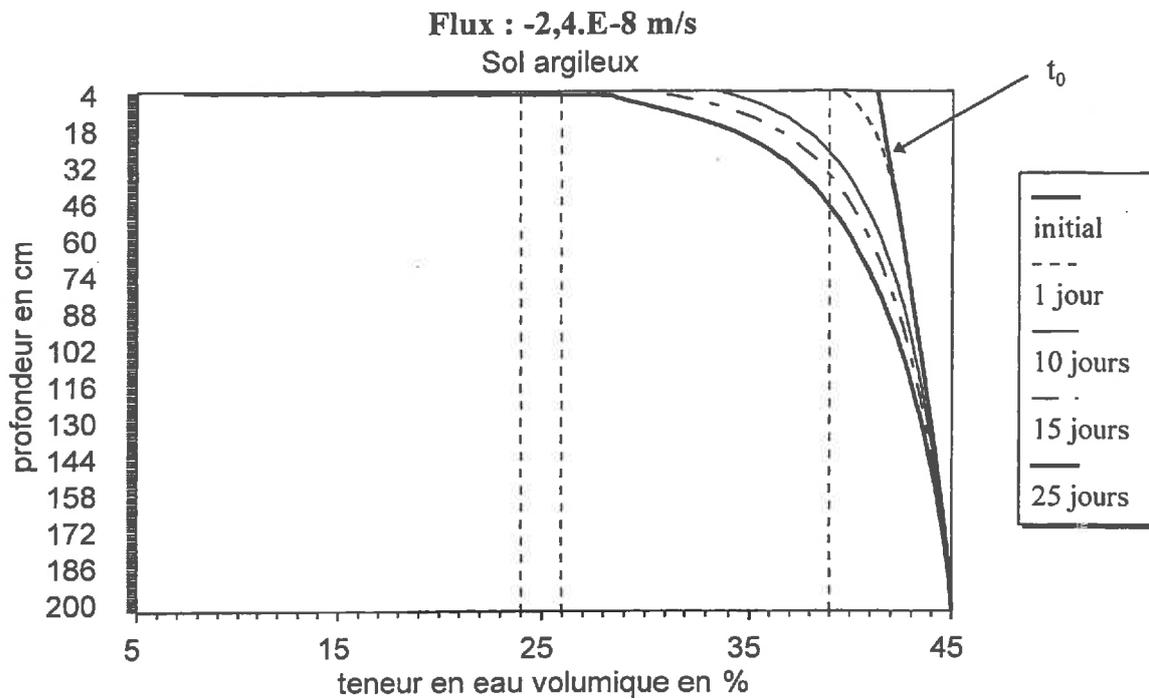
On note également qu'à partir d'un certain temps d'exposition, la couche superficielle est complètement desséchée ( $\theta = 6 \%$ ) par exemple : 74 jours pour un flux de  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  ou 25 jours pour un flux de  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ . A partir de cet instant le modèle ne peut plus être utilisé, car ses hypothèses de base ne sont plus respectées. Ceci est également indiqué par le bilan de masse qui diverge (cf. figure 5.28). Ce phénomène est en partie lié à la courbe perméabilité - succion qui est imposée au sol (cf. figure 5.20). En effet pour les faibles teneurs en eau ou les fortes succions, la perméabilité est peut-être trop faible et empêche toute migration de l'eau. Dans la réalité, ce phénomène d'induration existe mais la fissuration liée au retrait vient en partie le compenser. Donc nous ne retiendrons que la première partie de la simulation numérique.



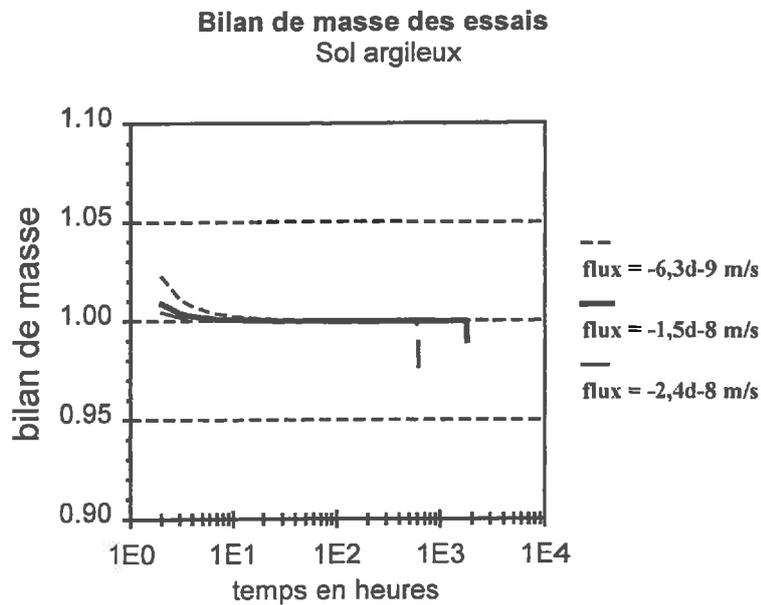
**Figure 5. 24 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse décennale**



**Figure 5. 25 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse centennale**



**Figure 5. 26 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse millénaire**



**Figure 5. 27 : Bilan hydrique des calculs**

Pour ce limon argileux, Gabriel de Los Cobos a établi les limites d'Atterberg et de retrait suivantes.

Teneurs en eau pondérales	WLiquidité	WPlasticité	Ws ou de retrait	Indice de Plasticité
01 Giobellina	25 %	16,5 %	15,3 %	8,5

Pour transposer ces teneurs en eau pondérales en teneurs en eau volumiques, on applique la formule :

$$\theta = w \cdot (\gamma_d / \gamma_w)$$

avec  $\gamma_d = 15,57 \cdot 10^3 \text{ kN.m}^{-3}$  poids volumique du sol sec ;  
 et  $\gamma_w = 10 \cdot 10^3 \text{ kN.m}^{-3}$  poids volumique de l'eau.

Ainsi on obtient le tableau des teneurs volumiques caractéristiques.

Teneurs en eau volumiques	$\theta$ Liquidité	$\theta$ Plasticité	$\theta_s$ ou de retrait
01 Giobellina	38,9 %	25,7 %	23,8 %

Ce limon a également été desséché progressivement et Gabriel de Los Cobos a mesuré les teneurs en eau d'apparition des premières fissures. « Sur la dizaine d'essais ainsi développés, les apparitions de fentes ont été effectives entre des teneurs en eau pondérales allant de 20 à 24 % (soit  $\theta$  allant de 31 à 37,4 %) excepté pour quelques essais où l'apparition des premières fentes se réalise pour  $w$  comprise entre 30 et 38 % (soit  $\theta$  comprise entre 46 et 59 %), valeurs bien supérieures à la limite de liquidité mesurée pour cette boue ». Nous avons donc choisi de suivre la teneur en eau volumique de 38 % (soit  $w = 24,4 \%$ ) qui est légèrement inférieure à la limite de liquidité et qui semble correspondre à une fissuration effective du matériau. La figure 5.29 présente la position du matériau à la teneur en eau limite en fonction du temps et du flux imposé en surface.

### Suivi de la teneur en eau limite en fonction du temps

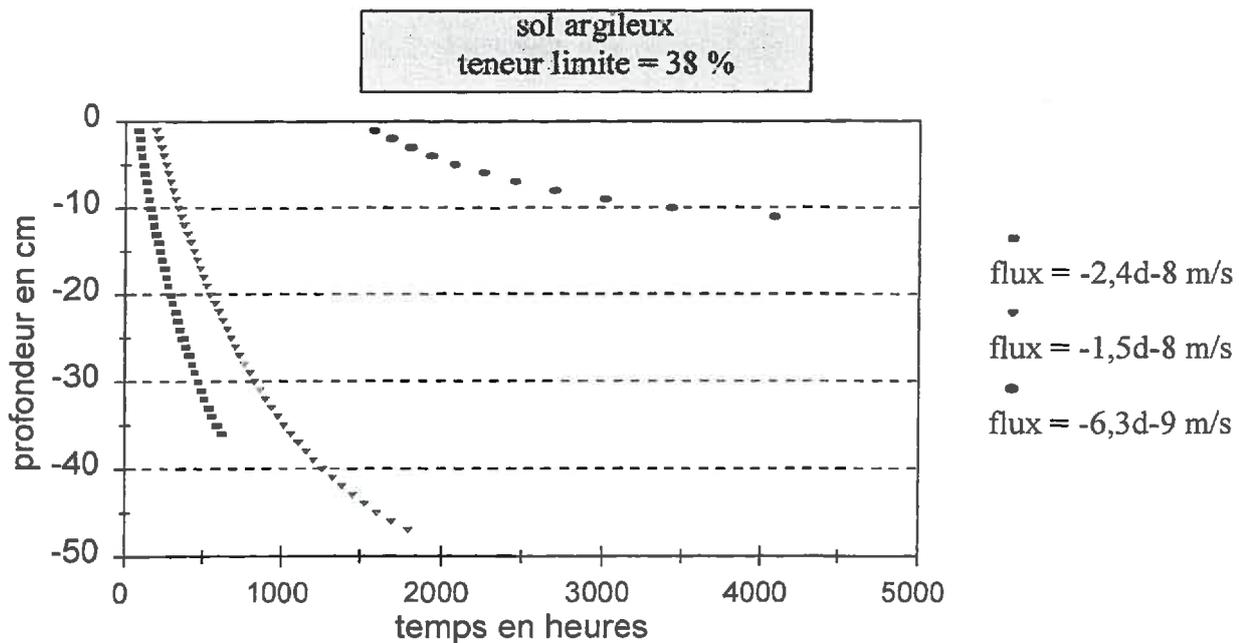


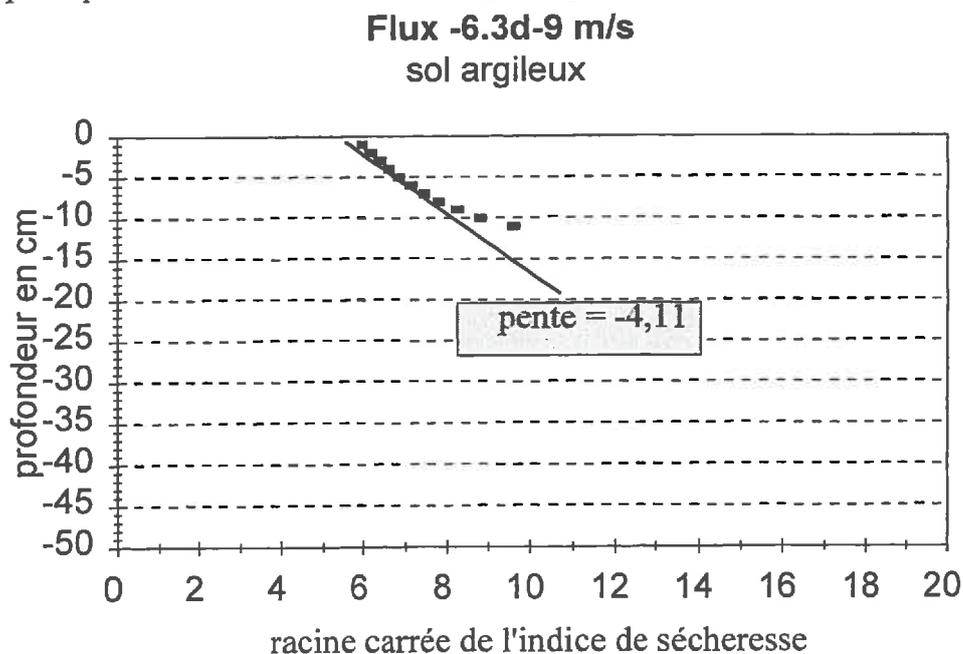
Figure 5. 28 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction du temps

La figure 5.29 montre qu'il faut déjà une certaine période d'exposition (fonction du flux évaporant) pour que la surface du modèle atteigne cette teneur limite, respectivement : 3 j, 8 j,

et 66 j. Ensuite la vitesse de la migration vers le bas de la couche dépend également du flux imposé puisque les courbes ne sont pas « parallèles ».

Alors que la première partie des courbes est proche de la linéarité, on observe un ralentissement de la progression en profondeur de la teneur limite avec le temps. Cet effet est lié à différents paramètres qui sont pour certains totalement dépendants du modèle utilisé et des conditions imposées aux limites du modèle. Par exemple, le fait d'imposer la saturation du sol à 2 m de profondeur a une influence sur la teneur en eau des terrains à 50 cm qui sont forcément plus humides. On notera que c'est une hypothèse forte. De même le comportement du sol simulé par les courbes conductivité hydraulique - succion n'est peut être pas très réaliste pour le domaine des très faibles teneurs en eau. En effet dans ce domaine la conductivité hydraulique est très faible. Cela provoque sur le modèle une croûte qui est peut être trop peu perméable en surface puisque la fissuration n'est pas prise en compte. De ce fait, nous ne retiendrons que la partie linéaire de ces courbes.

Dans le cadre de l'étude de l'indice de gel, nous avons vu que la profondeur de gel était pour un sol donné, linéaire en fonction de la racine carrée de l'indice de gel. De plus, la pente de cette droite ne dépendait que du sol et pas du scénario climatique. Nous avons essayé de voir si cela était vérifié pour l'indice de sécheresse. Nous avons donc tracé, comme on peut le voir sur les figures 5.30, 5.31 et 5.32, la profondeur de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse. Comme les limites du modèles apparaissent avant la fin d'une année de calcul, nous recalculons l'indice de sécheresse comme étant égal au flux instantané multiplié par 1000 pour avoir des millimètres d'eau et par 3600 pour avoir des heures de dessiccation ; ensuite cette valeur est multipliée par le nombre d'heure d'exposition nécessaire pour que la teneur en eau limite atteigne la profondeur donnée.



**Figure 5. 29 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse décennale**

Nous pouvons noter que la profondeur de dessiccation est quasi-linéaire avec la racine carrée de l'indice de sécheresse. Seulement nous pouvons aisément constater que la pente de cette « droite » dépend de façon importante du flux d'évaporation imposé. Ainsi la pente de la

droite de régression est respectivement de -7,43, -8,52 et -4,11 pour les flux de  $-2,4 \cdot 10^{-8}$ ,  $-1,5 \cdot 10^{-8}$  et  $-6,3 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ . Nous notons également qu'il n'y a pas de logique simple entre la valeur de la pente et la valeur du flux. Cela signifie que pour un sol le scénario climatique est très important dans le cadre d'une sécheresse. Ainsi la modélisation d'un été sec doit se faire en respectant l'événement climatique. Ceci n'est pas réalisable dans la pratique puisque l'événement climatique millennial n'est pas connu mais seulement estimé en intensité et durée. Afin de vérifier ce principe, nous avons choisi de tester un sol sableux.

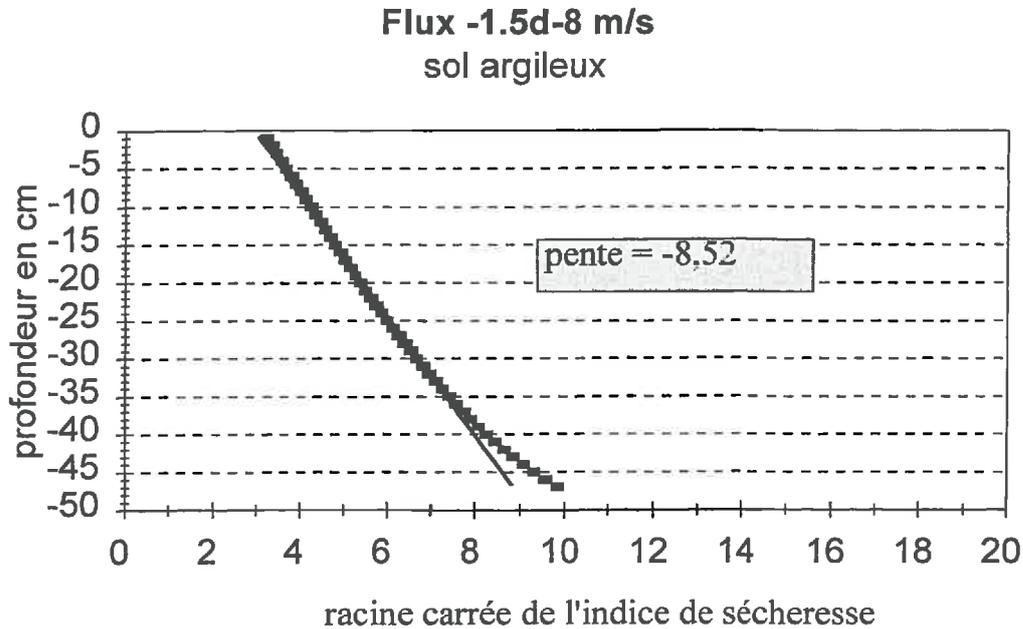


Figure 5. 30 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse centennale

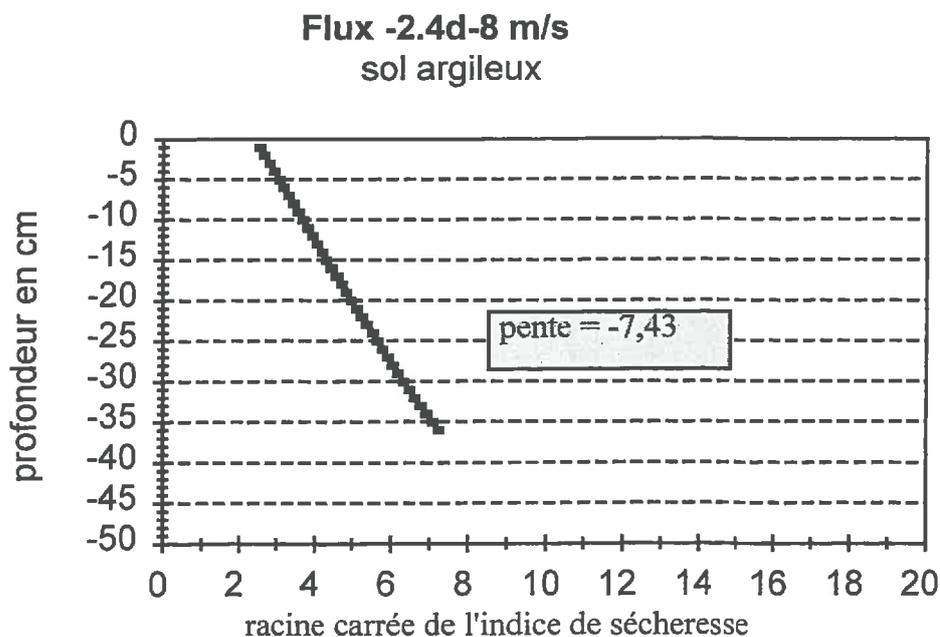


Figure 5. 31 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse millennale

### 3.2.2. Simulation de ces sécheresses sur un sol sableux

Le sol provient de la formation des sables grossiers du Paléoqueaternaire. Il est exploité dans la région de St. Sauveur le Vicomte (Manche). C'est un sable prélevé en carrière et lavé par l'exploitant. Il a été étudié par Marc Bourgeois (1986). La courbe granulométrique, l'essai Proctor, la courbe succion - teneur en eau et la courbe perméabilité - succion ont été établis par Bourgeois. Dans sa thèse, ce sable est appelé « sf3 ».

Pour la courbe succion ( $\Psi$ , en m) - teneur en eau ( $\theta$ , inférieure à 1) la formule choisie par Bourgeois est :

$$\theta = \theta_{ir} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{ir}) \cdot a}{\left(a + (100 \cdot \psi)^b\right)}$$

La relation capacité capillaire (C, en m<sup>-1</sup>) - succion ( $\Psi$ , en m) est l'opposé de la dérivée de la teneur en eau par rapport à la succion soit :

$$C = \frac{(\theta_{sat} - \theta_{ir}) \cdot a \cdot b \cdot (100 \cdot \psi)^{b-1}}{\left(a + (100 \cdot \psi)^b\right)^2}$$

Pour la courbe perméabilité (K, en m.s<sup>-1</sup>) - succion ( $\Psi$ , en m) la formule choisie par Bourgeois est :

$$K = K_{sat} \cdot \frac{A}{A + (100 \cdot \psi)^B}$$

Les caractéristiques hydriques données par Bourgeois pour ce sol sont :

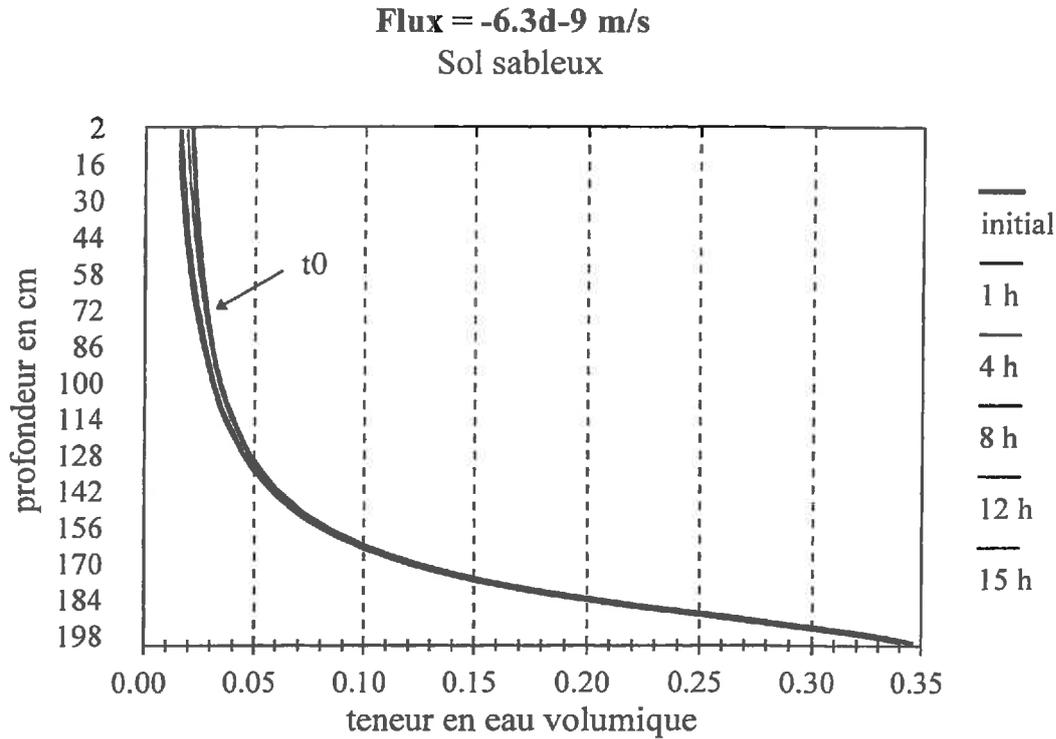
a	236,3
b	1,778
$\theta_{sat}$	0,35
$\theta_{ir}$	0,015
A	1623
B	2,607
K <sub>sat</sub>	1,67.10 <sup>-6</sup> m.s <sup>-1</sup>

Le volume représentatif est une couche de 2 m d'épaisseur. Le profil initial des succions est un profil linéaire d'équilibre (2 m au sommet et voisine de 0 m à la base). Le pas de temps de calcul est de 1 heure. Le pas d'espace du maillage est de 1.10<sup>-4</sup> m ou 0,1 mm. Le pas de maillage a été divisé par 100 car la perméabilité à saturation a été multipliée par 100 par rapport au sol argileux. Les conditions aux limites sont au sommet, le flux d'évaporation imposé, et à la base, la saturation via une succion imposée.

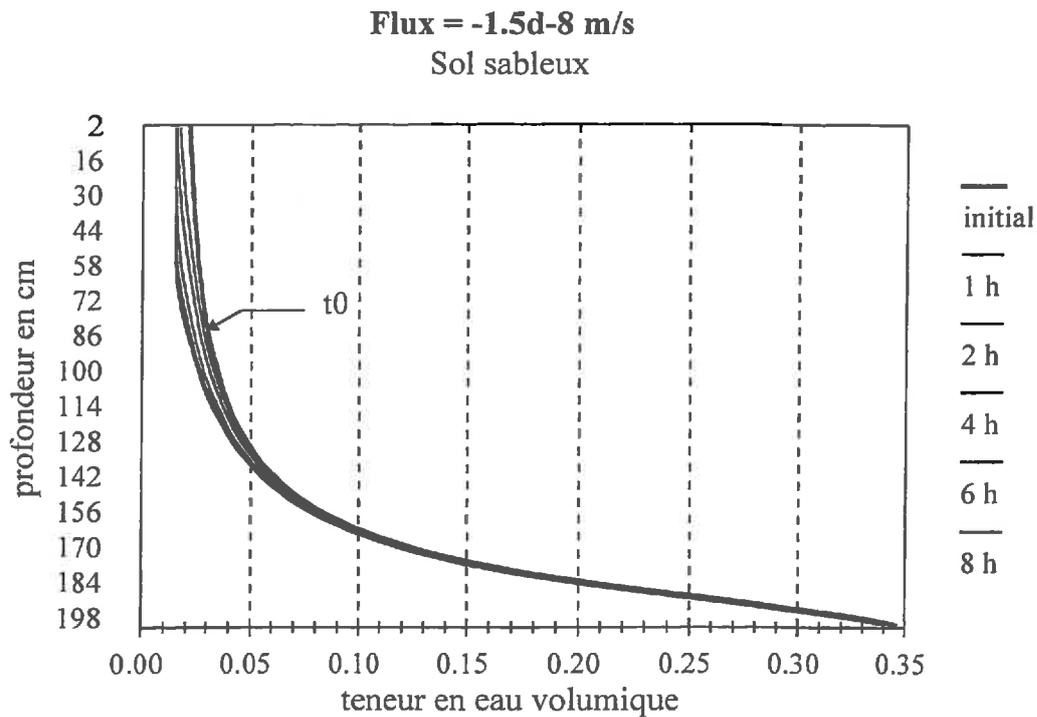
Les figures 5.33, 5.34 et 5.35 présentent l'évolution des teneurs en eau en fonction du temps et de la profondeur.

La teneur en eau « limite » d'une couche de sable dans une couverture de stockage dépendrait essentiellement de celle de la couche d'argile sous-jacente. En effet les matériaux sableux ne sont pas sujet au retrait lors de leur dessiccation. Au contact de 2 couches de matériaux différents, il y a continuité des succions avec discontinuité des teneurs en eau. Ainsi dans le cadre d'une étude de couverture de stockage, il faut choisir la teneur en eau critique des matériaux sableux en fonction de la succion correspondant à la teneur critique des matériaux argileux.

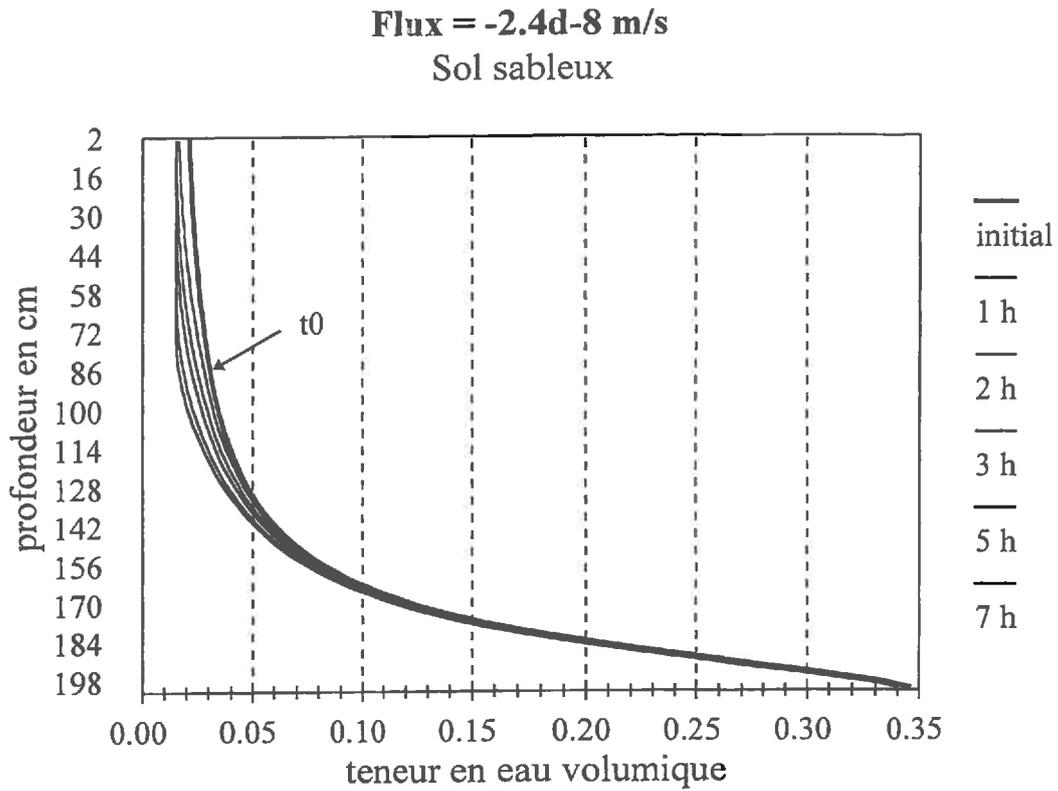
Dans notre cas d'étude,  $\theta_{\text{limite argile}}$  est égale à 38 %, donc d'après la courbe de la figure 5.16 ou la formule du paragraphe 2.2, cela correspond à une succion d'environ 3,65 m. Pour le matériaux sableux choisi, cette succion correspond à une teneur en eau volumique de 1,7 %, d'après la formule du paragraphe 3.2.2. La figure 5.36 présente le suivi de cette teneur en eau en profondeur en fonction du temps.



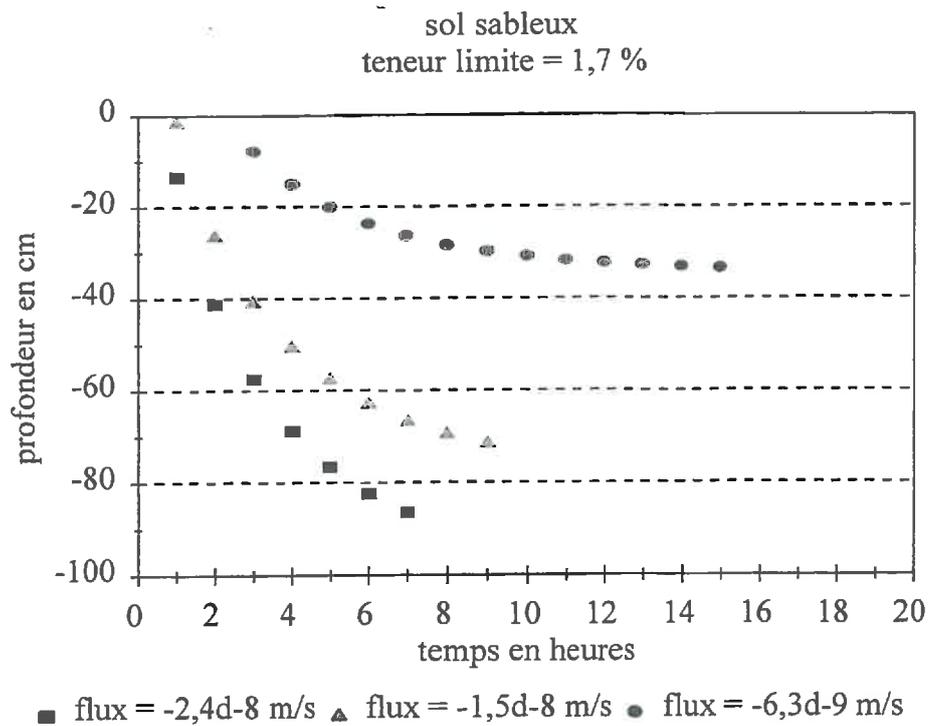
**Figure 5. 32 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse décennale**



**Figure 5. 33 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse centennale**



**Figure 5. 34 : Profil des teneurs en eau dans le cas d'une sécheresse millénaire**

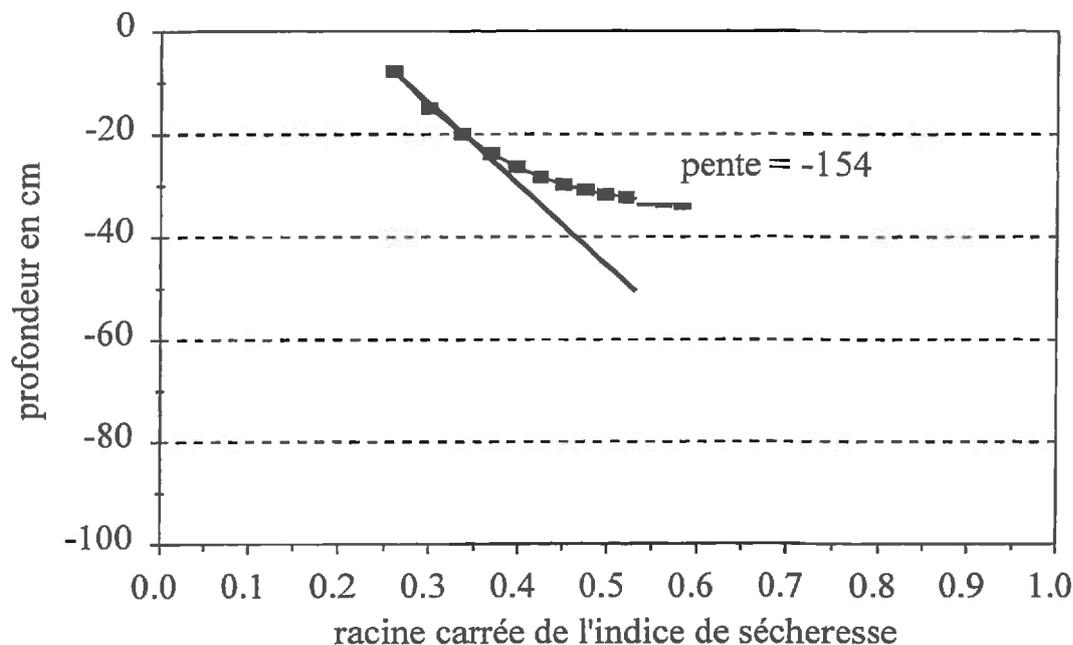


**Figure 5. 35 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction du temps**

Les figures 5.37, 5.38 et 5.39 présentent l'évolution de cette teneur limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse pour les 3 flux imposés.

**Flux = -6,3d-9 m/s**

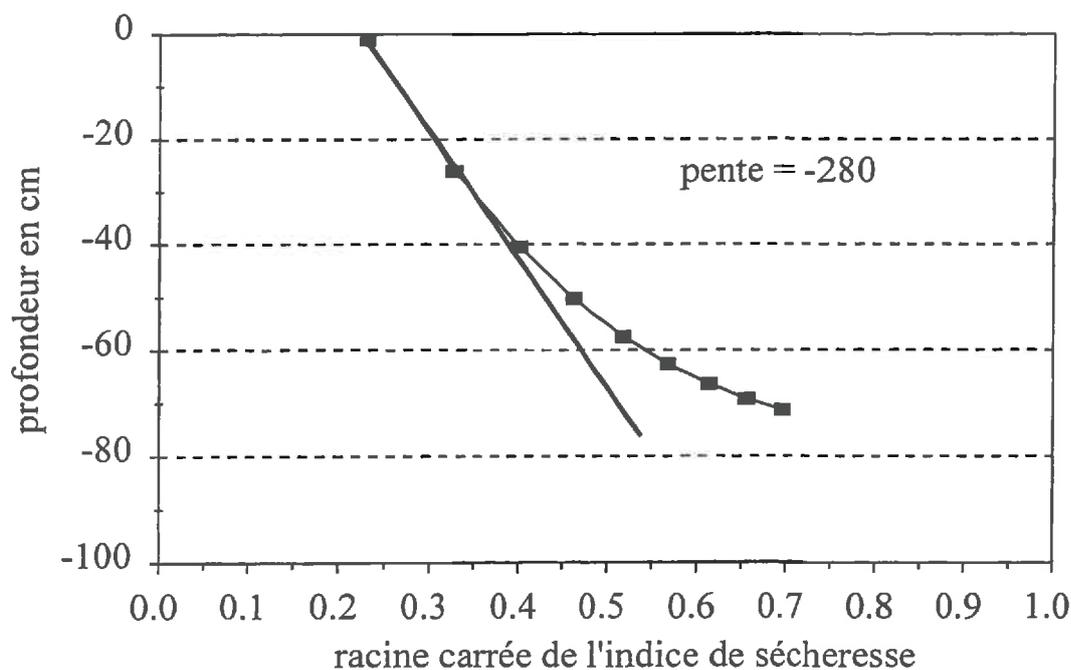
sol sableux



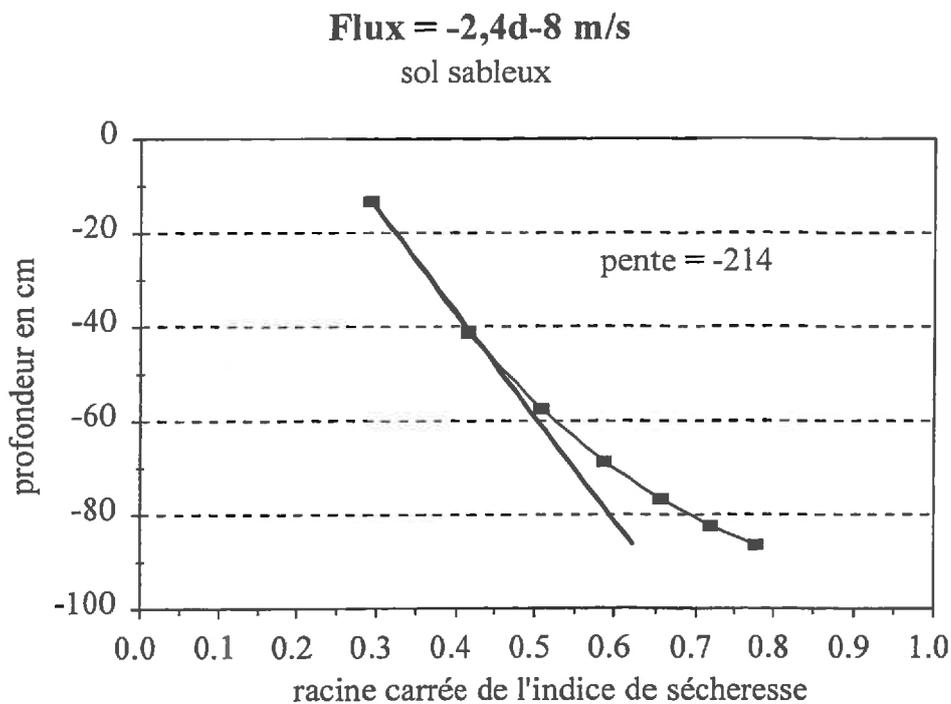
**Figure 5. 36 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse décennale**

**Flux = -1,5d-8 m/s**

sol sableux



**Figure 5. 37 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse centennale**



**Figure 5.38 : Suivi de la teneur en eau limite en fonction de la racine carrée de l'indice de sécheresse - cas de la sécheresse millennale**

On constate sur ces figures que l'épaisseur de dessiccation est également linéaire avec la racine carré de l'indice de sécheresse. Mais de la même manière que pour le sol argileux, la pente de cette droite varie en fonction du flux imposé et donc des conditions de sécheresse.

### 3.2.3. Analyse des résultats

Les simulations présentées montrent nettement la différence des comportements entre les matériaux argileux et les matériaux sableux. En effet pour l'argile choisie, les profils hydriques observés sont convexes alors que pour le sable ils sont concaves. Les matériaux sableux sont en effet très vite desséchés puisque les forces de contact eau - grains sont moins importantes. Les temps de dessiccation ne sont pas du même ordre de grandeur, de quelques heures pour les sables à quelques semaines pour les argiles.

Si l'on s'intéresse plus précisément à l'argile choisie, on peut calculer la profondeur de la teneur limite pour les valeurs de l'indice correspondantes aux sécheresses décennale, centennale et millennale (cf. tableau 5.8).

Pour ce calcul nous poserons 2 hypothèses qui vont dans le sens de la sécurité :

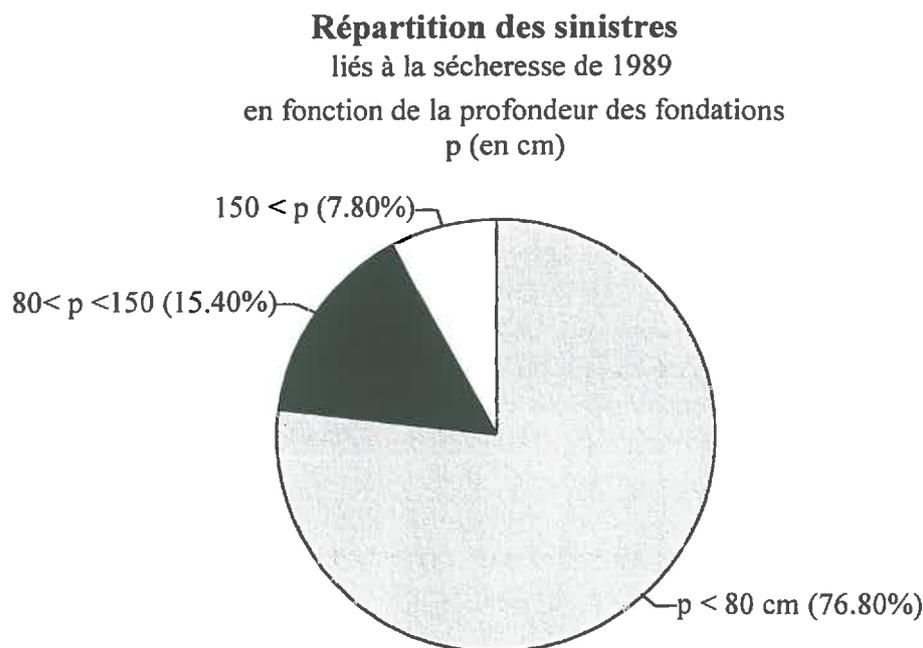
- au début de l'année de sécheresse, l'argile en surface est à la teneur limite ;
- la relation entre la profondeur de la teneur en eau limite et la racine carré de l'indice de sécheresse est linéaire.

**Tableau 5. 8 : Profondeur de la teneur en eau limite dans le cas des sécheresses extrêmes**

	indice de sécheresse en mm.j	pente de la droite de régression	profondeur de la teneur en eau limite en cm
sol argileux	200	-4.11	-58
	480	-8.52	-187
	750	-7.43	-203

On constate que pour la sécheresse décennale, la profondeur atteinte est de l'ordre de 60 cm alors que pour les sécheresses centennale et millennale cette profondeur avoisine 2 m. Ces valeurs sont assez cohérentes avec celles révélées par les sinistres observés sur les constructions lors de telles sécheresses. En effet en France, en 1989, sécheresse de période de retour comprise entre 50 et 100 ans, les constructions fondées à moins de 80 cm de profondeur sur des terrains argileux ont été très affectées (Faccendini, 1992). La répartition des sinistres en fonction de la profondeur des fondations est donnée sur la figure 5.40. Ces sinistres sont bien sûr dus au tassement résultant de la dessiccation et souvent accrus par la proximité d'arbres ou la pente des terrains. On note ainsi que lors de cette sécheresse la hauteur d'influence maximale est supérieure à 1,5 m.

Si l'on analyse les résultats de la simulation sur le sable, on déduit d'autres notions. La dessiccation est dans ce cas quasi - immédiate. Cette vitesse bien que vraisemblable est peut être exagérée par le modèle numérique qui ne tient pas compte des pressions d'air. Plusieurs auteurs dont Touma (1984) ont montré l'influence des pressions d'air sur la cinétique d'humidification ou de séchage d'un sable.



**Figure 5. 39 : Répartition de 551 cas de sinistre en fonction de la profondeur de fondation (tiré de Faccendini, 1992)**

Toutefois, dans le cadre de notre étude, on constate par le biais de la modélisation qu'une couche de sable, même très épaisse, reposant sur une couche d'argile ne pourrait retarder très

longtemps la dessiccation de cette dernière. Ainsi, si l'on souhaite protéger la couche d'étanchéité argileuse des couvertures de stockage vis à vis de la fissuration, il est nécessaire de les recouvrir par des terrains moyennement à peu perméables.

#### 4. Conclusion

Ainsi pour calculer l'épaisseur de sol altérée par une sécheresse ayant une grande période de retour, la méthode serait la suivante :

- calcul des indices de sécheresse annuels à partir des données quotidiennes de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman et des précipitations ;
- ajustement de ces indices à des lois statistiques de valeurs extrêmes : loi de Gumbel par exemple ;
- extrapolation de ces lois afin de lire les indices de sécheresses décennales, centennales, et millennales ;
- à partir de ces indices, calcul des flux hydriques instantanés correspondants à ces sécheresses ;
- application de ces flux, via un modèle numérique, aux matériaux choisis pour la réalisation de la couverture du stockage (cela implique une étude préalable du comportement hydrique des matériaux : établissement des courbes de teneur en eau - succion, perméabilité - succion, et teneur en eau limite de fissuration) ;
- enfin on suit grâce au modèle l'évolution de cette teneur en eau limite vers la profondeur en fonction de la durée de la sécheresse.

Nous notons que pour chaque étape de ce calcul, les simplifications choisies induisent parfois des erreurs ou des biais dans les calculs. Ainsi le choix de l'indice de sécheresse implique l'utilisation de la formule de Penman. Cette formule surévalue l'évapotranspiration mais nous avons justifié son emploi dans notre contexte. D'autre part, l'ajustement statistique de la valeur annuelle de l'indice n'a été fait que par la loi de Gumbel. D'autres lois de distribution, moins usitées, auraient pu être utilisées. Le modèle numérique de transfert hydrique utilisés ne tient pas compte des pressions d'air et ceci est pénalisant dans le cas des matériaux sableux. De plus il ne prend pas en compte les phénomènes d'hystérésis (observables entre le drainage et l'imbibition) de la courbe succion-teneur en eau des matériaux argileux. Ceci est négligeable lorsque l'on n'étudie que la phase de dessiccation, ce qui est le cas dans notre étude. Enfin nous n'avons pas tenu compte du flux thermique éventuellement dégagé par les déchets ; cette simplification ne va pas, dans notre contexte, dans le sens d'une plus grande sécurité.

Les résultats de cette simulation pourront alors servir de limites lors de la conception et du dimensionnement des couvertures de stockage de déchets. En effet, bien d'autres contraintes doivent être prises en considération de façon prioritaire (stabilité des ouvrages, techniques de réalisation, ...). L'évaluation de l'épaisseur de sol atteinte par une sécheresse a un intérêt indicatif. L'ordre de grandeur de l'épaisseur de sol est intéressante et non pas le résultat de la modélisation. En effet, les hypothèses de calcul sont potentiellement entachées d'erreurs. Il en est de même pour les ajustements statistiques. Ainsi le modèle numérique n'a nul besoin d'être perfectionniste car dans ce cas, il pourrait conduire l'utilisateur à se méprendre sur les objectifs de calculs.

Ainsi on peut conclure que l'estimation de l'épaisseur de dessiccation est possible mais que celle-ci sera entachée d'une erreur à priori plus grande que l'épaisseur de gel par exemple.

## Conclusion générale

---

Par cette étude nous avons essayé de répondre aux questions posées par les autorités de sûreté, par la législation récente et au souci croissant de protection de l'environnement visant à assurer la pérennité des couvertures de stockage de déchets.

En effet, comme nous l'avons vu, les performances des couvertures sont sensibles aux effets du climat et notamment des événements climatiques extrêmes. Nous avons donc adapté ou développé des méthodes visant à quantifier ces effets destructeurs. Chaque fois, notre démarche a suivi la même logique. Tout d'abord nous avons essayé de quantifier l'événement climatique par un coefficient : érosivité des averses, indice de gel et indices de sécheresse. Ensuite, par l'étude de longues séries de données, nous avons extrapolé la fréquence statistique de tel événement. Nous avons également vérifié que ces résultats étaient cohérents avec la réalité historique et enfin nous avons appliqué cet événement climatique à un sol ou à un modèle de couverture.

Pour le calcul de l'érosion, nous avons utilisé l'équation de Wischmeier habituellement appliquée au contexte agricole. Pour le calcul de la profondeur de gel, nous avons utilisé une méthode développée en technique routière. Chacune de ces deux méthodes a été appliquée à une couverture de stockage située dans une région climatique particulièrement agressive pour la France. Toutefois, dans les deux cas, nous avons fait référence au climat parisien (climat plus modéré) pour montrer que ce risque est important quelle que soit la région de France métropolitaine concernée.

Nous avons calculé l'effet érosif des averses de période de retour égale à 10, 100 ou 1000 ans. Egalement nous avons étudié les variations des divers paramètres de l'équation de Wischmeier et leurs impacts sur la quantité de terre érodée.

La profondeur atteinte par le gel a été calculée pour le gel décennal, centennal et millennal. En faisant varier les propriétés des matériaux composants la couverture, nous avons mis en évidence les aspects tendants à freiner la progression du gel.

Enfin nous avons essayé de définir un indice de sécheresse susceptible d'assurer une liaison entre les phénomènes climatiques et leurs effets au sol. Le calcul de cet indice a été appliqué à la station de Bergerac. Après avoir validé un modèle de transfert hydrique dans les sols, nous avons utilisé les valeurs de cet indice pour évaluer l'épaisseur d'argile desséchée et éventuellement fissurée lors d'une sécheresse. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les résultats d'études portant sur des phénomènes réels. Toutefois la méthode pourrait être perfectionnée à un ensemble multicouche et utiliser un modèle numérique à 2 voir 3 dimensions.

La complexité de certains calculs et l'aléa induit par certains paramètres impliquent que les méthodes proposées soient utilisées avec prudence et discernement. La précision des calculs dépend en grande partie de la rigueur apportée à l'évaluation des différents paramètres. Afin d'en faciliter l'usage, ces méthodes ont été détaillées et, à chaque étape, nous avons indiqué les plages d'erreur ou d'aléa.

Pour finir, cette étude s'est voulue méthodologique. Les études de cas réalisées à titre d'exemple d'application sont toutes situées en France, sous climat tempéré. Elles sont relatives à des stockages de déchets car notre point de départ a été la réglementation française relative aux couvertures de déchets toxiques qui exige leur pérennité "définitive". A défaut d'éternité nous sommes allés jusqu'à un terme millennial dans un esprit de recherche scientifique et d'ingénierie.

Nous aurions souhaité réaliser des expérimentations sur modèles physiques et sur planches d'essais et disposer de résultats de mesures sur site en vraie grandeur afin de confirmer ou infirmer nos résultats et affiner la méthodologie. Ceci devrait être réalisé à l'avenir avant l'utilisation de ces méthodes de calcul. Nous aurions également souhaité appliquer la même méthodologie à des climats et à des événements climatiques différents (effets du vent, typhons, ...) ainsi qu'à une plus grande variété d'ouvrages en terre voire à des formations naturelles. Nous espérons que ceci pourra être fait dans l'avenir.

## Références Bibliographiques

---

- "Mise hors gel des plate-formes ferroviaires" *document interne L.C.P.C.*
- 1973, "On Frost Action on Roads" 1, 2, 3 octobre, Oslo, Norvège, 2 vol., 385 et 449 p.
- ADEME**, Begassat, P., 1996, « French regulations and geomembranes : French disposal concept for hazardous and municipal waste », *Geosynthetics : Applications, Design and Construction*, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds) pp 559-562
- ANDRA**, « Le Centre de la Manche, la phase de surveillance », 22 p.
- ANDRA**, L., Thureau, 1993, « Couverture définitive du Centre de Stockage de l'Aube, étude de faisabilité », ISIGE, Thèse professionnelle, 4 vol.
- Angot, A.**, 1916, "Annale du bureau central météorologique de France, Mémoire".
- Arléry, R. et Dumont, A.P.**, 1949, "Comparaison des températures minimum au sol et sous abri", *La Météorologie, juin-sept.*, pp 157-165
- Arléry, R., Grisolle, H., Guilmet, B.**, 1973, "Climatologie, Méthodes, Pratiques", *Gauthier-Villars*, 2<sup>ème</sup> édition, 434 p.
- Arnould, M., Deveughèle, M., Dupas, A., Thénevin, I.**, 1995, "Les événements climatiques extrêmes et leurs conséquences géotechniques, exemple de l'érosion et du gel", *20<sup>ème</sup> journée du G.F.H.N.* 7 p.
- Arnould, M., Deveughèle, M., Thénevin, I.**, 1995, "Stockage de déchets miniers et résidus de traitement de minerai d'uranium, événements climatiques et effets au sol, approche préliminaire", *Rapport Armines, CGI ENSMP*, 71 p.
- Audiguier, M.**, 1979, "Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture", *Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole des Mines de Paris*, 146 p.
- Baudu, S.**, 1995, COGEMA, « Synthèse bibliographique sur les caractéristiques minéralogiques et pétrographiques des matériaux du site minier » Service d'études de procédés et analyses, 15 p.
- Benson, H.C.**, 1995, "Winter effect on hydraulic conductivity of compacted clay", *Journal of geotechnical engineering*, vol. 121, January 1995, pp 69-79
- Bessemoulin, J.**, 1987, "Atlas climatique de la France", édition réduite, Ministère des transports direction de la météorologie, 29 planches.
- Bourgeois, M.**, 1986, "Le concept de barrière capillaire, étude par modèle numérique", *Thèse de doctorat, CGI ENSMP*, 133 p.

- Bruckler, L., Passerat de Silans, A., Thony, J.L., Vauclin, M., 1989,** "Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil, comparaison with field observations", *Journal of Hydrology, (Amsterdam)*, 105, pp 109-138
- Calvet, C., 1984,** « Climatologie de la région parisienne, données et statistiques » *Direction de la météorologie*, 61 p.
- Croizat, G., Lauret, G., COGEMA, 1996,** « Technique de recouvrement des résidus des usines de traitement de minerai d'uranium », *Mines et Carrières - Industrie Minérales février 1996*.
- de Los Cobos, G., 1994,** "Valorisation des boues de lavage de gravière dans le domaine du stockage d'eau potable, d'eau chaude et de la rétention de substances polluantes", *Thèse n°1216, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 267 p.
- Dupas, A., et al, 1994,** « Modelling of permafrost thickness during the late glacial stage in France : preliminary results », *Can. J. Earth Sci.* 31, pp 959-968
- Dupas, A., Livet, J., Arnaud, Y, Brehin, C., 1987,** "Essai de gonflement au gel des sols", *Projet de méthode d'essai, L.C.P.C.*, 47 p.
- Dupas, A., Van Vliet-Lanoë, B., 1991,** « Development of soil fabric by freeze/thaw cycles - Its effect on frost heave », *Ground Freezing 91, Yu & Wang (eds), Balkema Rotterdam pp 189-195*
- Faccendini, J.P., 1992,** "Les effets de la sécheresse dans le domaine de la construction : Evaluation et cartographie des dommages et des risques", *D.E.A., C.G.I.*, 47 p.
- Fournier, F., 1960,** "Climat et Erosion", *Presses Universitaires de France*, 198 p.
- Frémond, M., Williams,P.J., 1977,** "gel des sols et des chaussées", *E.N.P.C., Ottawa 17-21 octobre 1977*, 82 p.
- Garnier, M., 1954,** "Contribution à l'étude des gelées en France", *La Météorologie, oct-déc.*, pp 369-378
- Garnier, M., 1982,** "Sur les températures dans le sol en France, Données et Statistiques", n°1, 198 p.
- Gousset P., 1981,** « le droit des installations classées pour la protection de l'environnement » *Technique et Documentation* 286 p
- Gril, J.J. et Duvoux, B., 1991,** "Maîtrise du ruissellement et de l'érosion", *CEMAGREF Antony*, 157 p.
- Grisollet, H., 1948,** "Etude des averses orageuses de la région parisienne envisagées au point de vue de leur évacuation par les ouvrages d'assainissement", *La Météorologie n°11*, pp 175-195
- Gumbel, E.J., 1958,** « Statistics of extremes », *Colombia university press*, 373 p.

**Haenel, R., et al**, 1980, "Atlas of subsurface temperatures in the European Community", *Commission des Communautés Européennes*, 43 cartes.

**Hallaire, M.**, 1954, "L'évapotranspiration réelle, mesure et interprétation dans les conditions naturelles", *La Météorologie*, oct-déc., pp 379-401

**Hallaire, V.**, 1988, "La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement, Modélisation morphologique", *Agronomie*, 8, (3), pp 273-280

**Hénensal, P.**, 1986, "L'érosion externe des sols par l'eau, approche quantitative et mécanismes", *Rapport de recherche LPC n°138*, 75 p.

**Hénensal, P.**, 1987, "Le risque d'érosion hydrique des sols", *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées juil-aout*, pp 117-129

**Hénensal, P.**, 1990, "L'érodimètre à jets mobiles", *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées mai-juin*, pp 47-52

**Hénensal, P.**, 1993, "Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux", *études et recherches des L. P. C.*, 111 p.

**Hénensal, P.**, 1995, "Essai d'érodabilité en laboratoire", *Projet de méthode d'essai LPC*, 29 p.

**Hillel, D.**, 1984, « Soil and Water. Physical principles and processes », édition Cabey, 270 p.

**Israelsen, C.E., et al.**, 1980, Erosion control during highway construction *NCHRP, Report 220, Transportation Research Board Washington*, 30 p.

**Israelsen, C.E., et al.**, 1980, Erosion control during highway construction Manual on principles and practices *NCHRP, Report 221, Transportation Research Board Washington*, 103 p.

**Jacq, V.**, 1995, « Inventaire des situations à précipitations diluviennes sur le Languedoc, la Provence Cote d'Azur et la Corse, période 1958-1994 », *Météo-France*, 189 p.

Journal Officiel

**Kessler, J., Chambraud, A.**, 1990, "Météo de la France, tous les climats localité par localité", *JC Lattes*, 391 p.

**Kirkby, M.J. et Morgan, R.P.C.**, 1980, "Soil Erosion", *British Géomorphological Research group*, 312 p.

**Laborde, J.P., Alexandre, C.**, 1996, « Les précipitations extrêmes en Mauritanie : Approche par l'analyse statistique des valeurs supérieures à un seuil », *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, n°38 & 39.

**Laborde, J.P., Mouhous, N.**, 1997, « Eléments d'hydrologie de surface », *UPRESA 6046 du CNRS, Université de Nice*.

**Le Bissonnait, Y.**, 1988, "Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies", *thèse à l'Université d'Orléans*, 225 p.

**Le Roy Ladurie, E.**, 1990, "Histoire du climat depuis l'an mil", *Réimp., Flammarion*, 288 p.

**Lévy, M.**, 1993, « GELSOL thermique hydraulique mécanique, manuel utilisateur », *rapport interne LCPC, non paginé*.

**Masson, J.**, 1980, "Mesure de l'agressivité des pluies en rapport avec l'érosion des sols", *La Météorologie*, n°20-21, pp 327-334

**Menézes, J.**, 1996, « Altération en climat méditerranéen des produits de recouvrement des résidus miniers de l'exploitation de Lodève » *rapport de stage au Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris*. 47 p.

**Ministère de l'Environnement, B.R.G.M.**, 1992, "Approche multicritère pour la conception de couvertures de centre d'enfouissement technique de déchets", 55 p.

**Ministère des Transports, Direction de la Météorologie**, 1983, "Normales Climatologiques 1951-1980", *Fasc. 1, Température*, 431 p.

**Ministère des Universités, Ministère de l'Agriculture**, 1979, "Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen", *Strasbourg-Colmar, 20-23 sept. 1978*, 251 p.

**Missenard, A.**, 1965, Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et de leurs mélanges", *Edition Eyrolles*, 554 p.

**Morris, P.,H., Graham, J., Williams, D.J.**, 1992, « Cracking in drying soils », *Can. Geotech. J.* 29, 263-277

**Mosimann, T.**, 1991, "Lutte contre l'érosion des sols cultivés", *Guide pour la conservation des sols*, 187 p.

**Nolf, J.L., COGEMA**, "Note relative à la climatologie et à la morphogenèse en climat méditerranéen", *document interne*, 7 p, 23 planches.

**Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture**, 1960, "La défense des terres agricoles contre l'érosion éolienne", *F.A.O.*, 99 p.

**Organisation Météorologique Mondiale**, 1990, "Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologique", *OMN n°8*, 400 p.

**Organisation Météorologique Mondiale**, 1990, "Guide des pratiques Climatologiques", *OMN n°100*, 200 p.

**Péguy, Ch. P.**, 1961, "Précis de Climatologie", *Masson & Cie Editeurs*, 347 p.

**Philipponnat, G.**, 1991, "Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie", *Revue Française de Géotechnique*, n°57, pp 5-22

- Pihan, J.**, 1978, "Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France", *Colloque sur l'érosion agricole*, Editeur H. et T. Vogt, Université Louis Pasteur, Stasbourg, 1979, pp 13-16
- Pongo, B.**, 1993, "Evolution spatio-temporelle des sols rouges ferrallitiques du bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire)", *Thèse 3ème cycle*, Université Paris 6, 208 p.
- Revel, J.C., Martinet, I.**, 1985, "Etude de simulation d'impact de foudre sur les sols", *C. R. Acad. Sc. Paris, t. 300, Série II, n° 4*, pp 151-156
- Riva, A.**, 1973, "Etude de la protection du sol contre l'érosion dans les vignobles au moyen de compost de gadoues", *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 87 p.
- Rouquès, G., Caniard, L.**, 1975, "Gel et dégel des chaussées" *Note d'information technique*, L.C.P.C., 33p.
- Sarrut, J., Vaillant, M.**, « Code Permanent de l'environnement et des nuisances », *Editions législatives et administratives*.
- Touma, J.**, 1984, « Etude critique de la caractérisation des sols non saturés : rôle de l'air. Influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. » *Thèse de 3ème cycle*. Université de Grenoble. 116 p.
- Velly, N.**, 1996, "Influence des sécheresses extrêmes sur les sols", *D.E.A. en Géomatériaux CGI ENSMP*, 37 p. 5 annexes.
- Wishmeier, W.H., Smith, D.D.**, 1978, "Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning", *U.S. Department of Agriculture, Handbook n°537*, 58 p.

## Annexe 1 : calcul de l'érosivité d'une averse

Averse du 21 au 22/09/1992 sur le Mont Lozère.

heure	eau en mm	cumulé en mm	h en cm	I cm.h <sup>-1</sup>	e en t.m.ha <sup>-1</sup>	e cumulé
18:00	0.6	0.6	0.06	0.6	0.11	0.11
18:06	0.0	0.6	0.00	0.0		0.11
18:12	1.2	1.8	0.12	1.2	0.26	0.37
18:18	0.0	1.8	0.00	0.0		0.37
18:24	1.4	3.2	0.14	1.4	0.31	0.69
18:30	1.4	4.6	0.14	1.4	0.31	1.00
18:36	3.4	8.0	0.34	3.4	0.87	1.87
18:42	1.6	9.6	0.16	1.6	0.37	2.24
18:48	1.2	10.8	0.12	1.2	0.26	2.50
18:54	0.8	11.6	0.08	0.8	0.16	2.66
19:00	0.8	12.4	0.08	0.8	0.16	2.82
19:06	1.2	13.6	0.12	1.2	0.26	3.08
19:12	0.0	13.6	0.00	0.0		3.08
19:18	0.0	13.6	0.00	0.0		3.08
19:24	0.8	14.4	0.08	0.8	0.16	3.24
19:30	0.0	14.4	0.00	0.0		3.24
19:36	0.6	15.0	0.06	0.6	0.11	3.36
19:42	0.0	15.0	0.00	0.0		3.36
19:48	0.6	15.6	0.06	0.6	0.11	3.47
19:54	0.6	16.2	0.06	0.6	0.11	3.59
20:00	0.6	16.8	0.06	0.6	0.11	3.70
20:06	1.0	17.8	0.10	1.0	0.21	3.91
20:12	0.0	17.8	0.00	0.0		3.91
20:18	0.0	17.8	0.00	0.0		3.91
20:24	1.0	18.8	0.10	1.0	0.21	4.12
20:30	0.0	18.8	0.00	0.0		4.12
20:36	2.0	20.8	0.20	2.0	0.47	4.59
20:42	0.0	20.8	0.00	0.0		4.59
20:48	0.8	21.6	0.08	0.8	0.16	4.75
20:54	1.0	22.6	0.10	1.0	0.21	4.96
21:00	1.2	23.8	0.12	1.2	0.26	5.22
21:06	0.0	23.8	0.00	0.0		5.22
21:12	0.4	24.2	0.04	0.4	0.07	5.29
21:18	2.2	26.4	0.22	2.2	0.53	5.82
21:24	2.0	28.4	0.20	2.0	0.47	6.30
21:30	1.0	29.4	0.10	1.0	0.21	6.51
21:36	0.0	29.4	0.00	0.0		6.51
21:42	0.0	29.4	0.00	0.0		6.51
21:48	1.6	31.0	0.16	1.6	0.37	6.87

heure	eau en mm	cumulé en mm	h en cm	I cm.h <sup>-1</sup>	e en t.m.ha <sup>-1</sup>	e cumulé
21:54	1.2	32.2	0.12	1.2	0.26	7.13
22:00	0.0	32.2	0.00	0.0		7.13
22:06	0.0	32.2	0.00	0.0		7.13
22:12	1.2	33.4	0.12	1.2	0.26	7.39
22:18	1.2	34.6	0.12	1.2	0.26	7.65
22:24	0.0	34.6	0.00	0.0		7.65
22:30	0.6	35.2	0.06	0.6	0.11	7.77
22:36	0.0	35.2	0.00	0.0		7.77
22:42	0.8	36.0	0.08	0.8	0.16	7.93
22:48	0.0	36.0	0.00	0.0		7.93
22:54	1.6	37.6	0.16	1.6	0.37	8.29
23:00	1.0	38.6	0.10	1.0	0.21	8.50
23:06	0.0	38.6	0.00	0.0		8.50
23:12	0.0	38.6	0.00	0.0		8.50
23:18	0.8	39.4	0.08	0.8	0.16	8.67
23:24	1.8	41.2	0.18	1.8	0.42	9.08
23:30	0.8	42.0	0.08	0.8	0.16	9.25
23:36	0.8	42.8	0.08	0.8	0.16	9.41
23:42	0.8	43.6	0.08	0.8	0.16	9.57
23:48	2.6	46.2	0.26	2.6	0.64	10.21
23:54	2.6	48.8	0.26	2.6	0.64	10.85
24:00	3.0	51.8	0.30	3.0	0.76	11.61
00:06	3.6	55.4	0.36	3.6	0.93	12.54
00:12	0.6	56.0	0.06	0.6	0.11	12.66
00:18	0.6	56.6	0.06	0.6	0.11	12.77
00:24	0.6	57.2	0.06	0.6	0.11	12.89
00:30	0.6	57.8	0.06	0.6	0.11	13.00
00:36	1.2	59.0	0.12	1.2	0.26	13.26
00:42	1.2	60.2	0.12	1.2	0.26	13.52
00:48	0.6	60.8	0.06	0.6	0.11	13.63
00:54	1.4	62.2	0.14	1.4	0.31	13.95
01:00	0.6	62.8	0.06	0.6	0.11	14.06
01:06	0.6	63.4	0.06	0.6	0.11	14.18
01:12	0.6	64.0	0.06	0.6	0.11	14.29
01:18	1.2	65.2	0.12	1.2	0.26	14.55
01:24	2.0	67.2	0.20	2.0	0.47	15.02
01:30	0.6	67.8	0.06	0.6	0.11	15.14
01:36	1.0	68.8	0.10	1.0	0.21	15.35
01:42	1.0	69.8	0.10	1.0	0.21	15.56
01:48	0.6	70.4	0.06	0.6	0.11	15.67
01:54	0.6	71.0	0.06	0.6	0.11	15.79
02:00	2.2	73.2	0.22	2.2	0.53	16.31
02:06	1.4	74.6	0.14	1.4	0.31	16.63
02:12	1.2	75.8	0.12	1.2	0.26	16.89
02:18	1.6	77.4	0.16	1.6	0.37	17.25

heure	eau en mm	cumulé en mm	h en cm	I cm.h <sup>-1</sup>	e en t.m.ha <sup>-1</sup>	e cumulé
02:24	2.6	80.0	0.26	2.6	0.64	17.89
02:30	2.6	82.6	0.26	2.6	0.64	18.54
02:36	2.6	85.2	0.26	2.6	0.64	19.18
02:42	0.8	86.0	0.08	0.8	0.16	19.34
02:48	2.0	88.0	0.20	2.0	0.47	19.81
02:54	4.0	92.0	0.40	4.0	1.05	20.87
03:00	4.0	96.0	0.40	4.0	1.05	21.92
03:06	5.4	101.4	0.54	5.4	1.49	23.41
03:12	0.6	102.0	0.06	0.6	0.11	23.52
03:18	2.2	104.2	0.22	2.2	0.53	24.05
03:24	3.4	107.6	0.34	3.4	0.87	24.93
03:30	2.0	109.6	0.20	2.0	0.47	25.40
03:36	1.0	110.6	0.10	1.0	0.21	25.61
03:42	0.6	111.2	0.06	0.6	0.11	25.72
03:48	0.6	111.8	0.06	0.6	0.11	25.84
03:54	3.0	114.8	0.30	3.0	0.76	26.60
04:00	3.6	118.4	0.36	3.6	0.93	27.53
04:06	3.0	121.4	0.30	3.0	0.76	28.29
04:12	8.4	129.8	0.84	8.4	2.45	30.74
04:18	12.0	141.8	1.20	12.0	3.67	34.41
04:24	15.0	156.8	1.50	15.0	4.72	39.13
04:30	13.0	169.8	1.30	13.0	4.02	43.15
04:36	6.0	175.8	0.60	6.0	1.68	44.83
04:42	0.6	176.4	0.06	0.6	0.11	44.94
04:48	0.0	176.4	0.00	0.0		44.94
04:54	1.6	178.0	0.16	1.6	0.37	45.31
05:00	4.6	182.6	0.46	4.6	1.24	46.55
05:06	2.6	185.2	0.26	2.6	0.64	47.19
05:12	1.4	186.6	0.14	1.4	0.31	47.50
05:18	7.0	193.6	0.70	7.0	2.00	49.50
05:24	9.8	203.4	0.98	9.8	2.92	52.42
05:30	6.0	209.4	0.60	6.0	1.68	54.09
05:36	4.6	214.0	0.46	4.6	1.24	55.33
05:42	9.0	223.0	0.90	9.0	2.65	57.99
05:48	0.0	223.0	0.00	0.0		57.99
05:54	10.0	233.0	1.00	10.0	2.99	60.98
06:00	15.4	248.4	1.54	15.4	4.86	65.84
06:06	14.2	262.6	1.42	14.2	4.44	70.28
06:12	13.4	276.0	1.34	13.4	4.16	74.43
06:18	8.0	284.0	0.80	8.0	2.32	76.76
06:24	8.2	292.2	0.82	8.2	2.39	79.15
06:30	2.0	294.2	0.20	2.0	0.47	79.62
06:36	1.2	295.4	0.12	1.2	0.26	79.88
06:42	1.0	296.4	0.10	1.0	0.21	80.09
06:48	0.0	296.4	0.00	0.0		80.09

heure	eau en mm	cumulé en mm	h en cm	I cm.h <sup>-1</sup>	e en t.m.ha <sup>-1</sup>	e cumulé
06:54	0.6	297.0	0.06	0.6	0.11	80.20
07:00	2.0	299.0	0.20	2.0	0.47	80.68
07:06	0.0	299.0	0.00	0.0		80.68
07:12	0.6	299.6	0.06	0.6	0.11	80.79
07:18	0.0	299.6	0.00	0.0		80.79
07:24	0.6	300.2	0.06	0.6	0.11	80.91
07:30	0.0	300.2	0.00	0.0		80.91
07:36	0.6	300.8	0.06	0.6	0.11	81.02
07:42	0.0	300.8	0.00	0.0		81.02
07:48	1.0	301.8	0.10	1.0	0.21	81.23
07:54	4.0	305.8	0.40	4.0	1.05	82.28
08:00	5.6	311.4	0.56	5.6	1.55	83.83
08:06	0.6	312.0	0.06	0.6	0.11	83.95
08:12	0.6	312.6	0.06	0.6	0.11	84.06
08:18	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:24	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:30	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:36	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:42	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:48	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
08:54	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06
09:00	0.0	312.6	0.00	0.0		84.06

## Annexe 2 : chroniques climatologiques : hivers

---

Nota : *Ces données sont extraites intégralement de "Climatologie de la France, Sélection de données statistiques" par M. Garnier 1967.*

763-764. - Hivers très rigoureux au cours duquel la mer fut gelée sur nos côtes. Dans l'intérieur de la Gaule, des froids extraordinaires furent signalés du début d'octobre 763 à la fin février 764. En certaines contrées de notre pays, il serait tombé, aux dires des historiens, jusqu'à 10 mètres de neige.

821-822. - Tous les fleuves d'Europe, en particulier la Seine, l'Elbe et le Danube, furent pris par les glaces pendant plus d'un mois. "Les plus grandes rivières de la Gaule et de la Germanie furent tellement glacées que pendant l'espace de trente jours et davantage, on y passait par dessus à cheval et avec des charrettes."

859-860. - Hiver très rude et très long, durant depuis novembre jusqu'en avril. Chutes de neige abondantes.

974-975. - Dans les Gaules, l'hiver fut "long, sec et dur" ; il se prolongea du début de novembre au 20 mars : en mai il tomba encore beaucoup de neige.

1073-1074. - Fortes gelées du début de novembre jusqu'au 15 avril, accompagnées de vent du nord violent et desséchant. "Les moulins ne pouvant fonctionner par suite de la prise des fleuves et rivières, l'armée d'Henri IV, empereur d'Allemagne, souffrit cruellement du manque de farine et par suite de pain."

1076-1077. - Un des hivers les plus rudes du XI<sup>ème</sup> siècle, d'après les témoignages des contemporains. De très fortes gelées se produisirent du 1<sup>er</sup> novembre au 15 avril, et le Rhin ainsi que le lac de Constance, furent pris par les glaces, de la Saint-Martin jusqu'à la fin mars. "Cette année fut si étrangement froide que la plupart des arbres, vignes et fruitiers moururent, que les semences en furent intéressées et que la terre devint stérile pour les quelques années suivantes."

1114-1115. - Hiver terrible en Bretagne de même qu'en Angleterre. "La mer gela dans la Manche à quelques distances des côtes, et les pierres les plus grosses se fendirent avec éclat."

1124-1125. - Froids extraordinaires avec chutes de neige abondantes en France, en Allemagne et en Italie. "Dans les rivières, la glace était si épaisse et si solide qu'elle supportait les voitures chargées ; les chevaux circulaient sur le Rhin comme sur la terre ferme. Ces intempéries se prolongèrent tellement que les arbres ne prirent leurs feuilles qu'en mai."

1149-1150. - Hivers très rigoureux dans le Nord de la France, où, sur les côtes, les eaux de mer étaient gelées jusqu'à trois milles du rivage. Dura du début de décembre à la fin février.

1204-1205. - En Bretagne et dans le Nord-Ouest de la France, "grand hiver de la mi-janvier à la mi-mars".

1218-1219. - Dans le Centre de la France, l'hiver fut si rude et si long que par trois fois la Seine, la Loire et la Vienne se trouvèrent suffisamment gelées pour qu'elles puissent être traversées sur la glace.

1224-1225. - Hiver rigoureux depuis la St-Denis (9 octobre) jusqu'à la St-Marc (25 avril), avec de fortes tempêtes ayant abattu en Normandie plusieurs clochers d'églises.

1233-1234. - Hiver très rigoureux dans l'extrême Est de la France et en Italie. Le Rhône et le lac de Zurich furent congelés. Des voitures chargées purent arriver de la terre ferme jusqu'à Venise en passant sur la glace.

1235-1236. - Toutes les rivières furent prises par les glaces, dont la débâcle entraîna la chute des ponts de Saumur et de Tours.

1275-1276. - Hiver très froid, mais de courte durée, avec des chutes de neige abondantes dans l'Est. A Parme, le sol resta couvert de neige du mois de décembre 75 au mois d'avril 76.

1291-1292. - En Alsace, le mois de février 1292 fut remarquablement froid. Le Rhin gela à Brisach, où les chevaux et les voitures pouvaient le traverser sur la glace.

1302-1303. - En décembre 1302, froids exceptionnels dans l'Est et le Sud-Est du pays, surtout vifs du 26 décembre au 6 janvier. Le Doubs, le Rhin et le Rhône furent gelés. "En leurs lits, on trouvait les gens morts par angoisse de froid."

1305-1306. - Froids très vifs du 15 décembre au 25 janvier, et du 15 février à la fin Mars. Tous les grands fleuves furent pris par les glaces.

1315-1316. - L'hiver se montra si rigoureux en France, en Allemagne et en Angleterre, depuis le début de décembre 1315 jusqu'à Pâques 1316, qu'il provoqua une famine générale. "On était obligé, lit-on dans l'Histoire d'Angleterre de Rapin de Thoyras, de cacher les enfants avec un soin extrême, si on ne voulait les exposer à être dérobés pour servir d'aliments aux larrons."

1322-1323. - La partie occidentale de la mer Baltique fut couverte de glaces du début de février au 15 mars. En février, il tomba beaucoup de neige en France. Certains auteurs prétendent que la mer Adriatique fut également gelée.

1324-1325. - Hivers très rigoureux dans le nord de la France. La Seine gela deux fois et au cours de la débâcle les deux ponts de bois de Paris furent emportés.

1357-1358. - Les contemporains affirment qu'il tomba au cours de cet hiver des quantités prodigieuses de neige comme on n'en avait encore jamais vu, surtout en Italie, en Belgique et en Angleterre.

1363-1364. - Dans le Centre et le Midi de la France, l'hiver fut très long et ne se termina qu'à la fin de mars : à Paris, on compta quatorze semaines consécutives de fortes gelées durant lesquelles le sol resta couvert de neige. Le lac de Zurich, le Rhône et le Rhin furent gelés jusqu'à une grande profondeur. La Loire étant gelée "la ville de Tours employa trente-huit hommes pour rompre les glaces de la Loire afin d'empêcher les assiégeants de passer".

1407-1408. - Félibien écrit : "Tous les annalistes de ce temps là ont pris soin de remarquer que cet hiver fut le plus cruel qui eût été depuis plus de 500 ans. Il fut si long qu'il dura depuis la St-Martin jusqu'à la fin de janvier et si âpre que les racines de vignes et des arbres fruitiers gelèrent. Toutes les rivières étant gelées et les voitures passaient sur celle de Seine à Paris. A Paris, pendant soixante-six jours les gelées atteignirent une intensité exceptionnelle.

1419-1420. - Hivers rude en France avec beaucoup de neige. Les loups pénétraient jusque dans les faubourgs de la capitale, qui se trouvait alors aux mains des Anglais.

1422-1423. - Froids excessifs en Hollande et dans le nord de la France. La Seine fut prise en janvier. Ces fortes gelées accompagnées de neiges durèrent jusqu'au 25 mars.

1434-1435. - Hiver très long, appelé en Angleterre "la grande gelée" car il se prolongea du 24 novembre au 10 février : "Dans le nord il neigea près de quarante jours consécutifs, la nuit comme le jour. Les plus lourdes voitures traversaient la Seine gelée à Paris. L'eau qui écoulait des linges mouillés placés devant le feu pour sécher gelaient en tombant."

1442-1443 - C'est surtout dans le midi que cet hiver fut remarquable. "Les rivières du pays de Gascogne, du Languedoc et du Quercy gelèrent si fort que nul ne pouvait aller ni à pied, ni à cheval par suite des neiges qui étaient chutées sur la terre. A Carcassonne il y en avait six pied de hauteur."

1457-1458. - Du 20 novembre jusqu'à la fin février l'hiver se montra très rigoureux. De nombreuses rivières furent prises par les glaces et une armée de 40.000 hommes put camper sur le Danube congelé. La saison se termina par une abondance exceptionnelle de chutes de neige dans la région parisienne.

1480-1481. - L'hiver fut très froid et très long, car il se prolongea pendant plus de six mois. La Seine, l'Oise, la Marne et l'Yonne furent gelées. En Bretagne, des gelées d'une exceptionnelle intensité se produisirent de Noël 80 à la fin février 81. Les vignes périrent en grand nombre dans l'Est : dans certaines contrées, "on coupait le vin avec la hache et la cognée et on le vendait au poids".

1490-1491. - Dans l'Est il fut appelé "l'hiver des grandes neiges".

1507-1508. - Hiver rigoureux dans le Midi. Le jour de l'Épiphanie, il tomba à Marseille près de 1 mètre de neige.

1513-1514. - On compta dans le nord et l'est douze semaines de fortes gelées, le Rhin fut pris en totalité et on put le traverser pendant onze jours.

1534-1535. - L'hiver fut rude dans le Massif Central. "Le Lot gela en janvier et on pouvait le traverser sans danger."

1543-1544. - "L'hiver fut si rigoureux en Bretagne que la plupart des plantes gelèrent jusqu'à la racine." Dans le nord du pays le froid fut si vif en décembre et au début de janvier qu'il fallait couper le vin dans les muids à coup de hache et le vendre au poids.

1552-1553. - L'hiver fut dur dans le nord et dans l'est. Lors du siège de Metz par Charles Quint, on fut obligé de couper les jambes de nombreux soldats transis par le froid.

1554-1565. - A Paris, les grands froids durèrent de la fin décembre 1564 jusqu'au 20 mars 1565. Sur la Somme gelée, "on établit des loges où il se vendait des vivres comme en plein marché". En Provence, les oliviers périrent en grand nombre et, à Arles, le Rhône fut pris dans toute sa largeur. Partout la neige tomba en abondance, en particulier dans l'Aude où les chutes se prolongèrent pendant plus de huit jours et dans la Vendée où par places son épaisseur atteignit six pieds.

1568-1569. - En décembre 1568, toutes les rivières de France furent prises par les glaces. Le froid reprit ensuite en février, mars et avril. En Vendée, les rigueurs de cet hiver s'y firent sentir "de Noël à la St-Vincent". Devant Bordeaux "la mer gela et la glace y était de la hauteur d'un homme".

1570-1571. - L'hiver fut si rude de la fin novembre à la fin février que pendant ces trois mois, les rivières restèrent suffisamment gelées pour supporter tous les charrois : le 10 mars, la Meuse et le Rhin étaient encore gelés.

1594-1595. - Hiver très rigoureux du début de décembre jusqu'à la mi-janvier. Le froid reprit le 13 avril avec une intensité aussi grande qu'en décembre, ce qui occasionna à Paris beaucoup de morts subites ; à cette même date, de nombreuses hirondelles tombèrent mortes de froid. Toutes les rivières de l'Europe occidentale et centrale, de même que les lagunes de Venise, furent prises fortement.

1607-1608. - Appelé pendant longtemps le grand hiver, car de la mi-décembre à la mi-mars les rigueurs d'un froid intense se firent sentir sur toute l'Europe septentrionale et occidentale. Le Rhin fut pris depuis son embouchure jusqu'en amont de Cologne. "Devant Anvers, l'Escaut gela si fort que l'on y bâtit dessus plusieurs tentes et pavillons où s'y vendaient toutes sortes de victuailles. le 10 janvier, le vin gela dans le calice à l'église St-André-des-Arts de Paris, et écrit l'Estoile, "il fallut chercher un réchaud pour le fondre".

1615-1616. - Des historiens rapportent que dans la Sarthe, l'épaisseur de la couche de neige atteignait la hauteur d'un homme. A Paris, la Seine fut gelée du 1<sup>er</sup> au 31 janvier, et, lors de la débâcle, un côté du pont St-Michel se trouva renversé.

1620-1621. - Hiver très long, avec gelées particulièrement rudes de la fin janvier à la fin de février. En ce dernier mois, la mer fut prise par les glaces à Dunkerque. Le port de Calais fut gelé, de même que l'Escaut. Les froids furent également très vifs en Provence, et les glaces des lagunes de l'Adriatique emprisonnèrent la flotte vénitienne.

1640-1641. - Dans le Massif Central, cet hiver "le plus terrible qui ait été de la souvenance des vivants" se prolongea du début d'octobre jusqu'au mois de mai.

1655-1656. - Hiver très rigoureux en France et en Allemagne à partir du 25 novembre. Chutes de neige abondantes. La Seine gela à Paris du 8 au 16 décembre.

1657-1658. - A Paris, le mois de janvier et le début de février furent extrêmement froids et la Seine fut gelée du 1<sup>er</sup> au 21 février. C'est au cours de cet hiver que Charles X, roi de Suède fit traverser le Petit Belt sur la glace par toute son armée, y compris la cavalerie, l'artillerie, les caissons...

1659-1660. - Il y eut deux séries de très fortes gelées, la première de Noël à la mi-janvier et la seconde en février. "Cette froidure surpassa celle du grand hiver 1607-1608.

1662-1663. - Hiver long avec gelées presque continues à Paris du 5 décembre au 8 mars. En décembre, la Seine était entièrement prise.

1669-1670. Froid excessif en janvier et en février. Pendant ces deux mois l'Escaut fut entièrement pris.

## Annexe 3 : chroniques climatologiques : étés

---

Nota : *Ces données sont extraites intégralement de "Climatologie de la France, Sélection de données statistiques" par M. Garnier 1967.*

1135. - "Il fit si chaud que la terre brûlait en divers endroit de la France."

1137. - Dans les régions septentrionales et centrales de la France, sécheresse d'une durée de sept mois (mars à septembre), accompagnée en juillet et août de chaleurs terribles.

1176. - La sécheresse provoque une disette générale dans tout le Centre.

1179. - La sécheresse est si forte dans le Quercy que le lin n'y donne aucun produit : "le prix d'une chemise s'éleva alors de 9 à 24 deniers".

1183. - Par suite des chaleurs torrides, les vendanges commencent dans l'Est dès la fin juillet.

1187. - La chaleur et la sécheresse extraordinaires de cet été provoquent "un embrasement général de la ville de Chartres".

1225. - La sécheresse extrême qui sévit dans le Centre provoque une récolte des blés presque nulle et occasionne la chute avant maturité de la plupart des fruits.

1228. - En Alsace, la moisson est terminée au début de juillet grâce au temps très chaud des semaines précédentes.

1232. - La chaleur est si forte dans l'Est que "dans les mois de juillet et d'août les oeufs y cuisaient dans le sable".

1268. - Dans les environs de Colmar, on note des températures très élevées avec une absence totale de pluie pendant douze semaines. Ces conditions atmosphériques furent cause d'une telle abondance de fruits que de nombreux arbres s'en trouvèrent brisés.

1277. - Sécheresse excessive dans le Nord et le Centre : les puits et fontaines tarissent tandis que les ruisseaux cessent de couler.

1282. - "En Alsace, les pauvres mangeaient du blé nouveau le 10 juin et des potirons le 20 juillet. La vendange eu lieu avant le 14 septembre.

1293. - Par suite de l'été chaud et sec, le vin dans l'Est est remarquablement bon et abondant.

1297. - A Colmar, les raisins sont mûrs à la St-Dominique (4 août).

1303. - Année exceptionnellement chaude et pluvieuse. La Seine, l'Oise et la Loire sont à sec. "En Alsace, on voyait des raisins mûrs à la St-Jean. Les cours d'eau étaient tellement desséchés que ceux qui faisaient tourner deux roues de moulins pouvaient à peine en mouvoir une, ce qui fit que malgré l'abondance du blé, le pain se vendait cher. Par suite des chaleurs excessives, le Rhin était assez bas entre Strasbourg et Bâle pour qu'en beaucoup d'endroits on pût le traverser à pied.

1305. - Très grande sécheresse pendant l'été.

1314. - Été très sec avec treize semaines sans pluie dans l'Est. Les céréales se dessèchent. Il en résulte une grande disette et la peste.

1338. - Sécheresse intense et de longue durée dans le Centre.

1343. - Chaleur si forte dans l'Est que les grains sont grillés dans les vignes.

1420. - Année très chaude en Lorraine où les fraises sont mûres dès le 19 avril, les cerises le 9 mai et les raisins le 18 juin; le 22 juillet on boit du vin nouveau.

1422. - Dans la région parisienne et en Champagne, on vendange à la fin d'août.

1442. - On vendange dans l'Est le 7 septembre.

1458. - Il ne tombe aucune pluie dans l'Est, d'avril jusqu'à la mi-octobre.

1463. - Sécheresse remarquable dans le Nord : aussi dès la fin de juin fait-on dans cette région de nombreuses processions pour demander la pluie.

1467. - Été très sec dans l'Est où le vin est abondant et très bon.

1473, 1476 et 1479. - En chacune de ces années, les chaleurs de l'été sont mentionnées comme "extraordinaires, terribles et intolérables". La sécheresse de 1473 dura plusieurs mois et, au dire des historiens, "s'étendit à presque toute la terre"; en cette année à Dijon on vendangea le 20 août.

1483. - Dans l'Est, l'été est tellement chaud qu'on y fait deux vendanges.
1493. - Les chaleurs excessives de juillet et d'août réduise la Moselle à Metz à n'être plus qu'un ruisseau.
1504. - Dans l'Est et le Sud-Est, chaleur et sécheresse remarquables : "ciel de cuivre et terre de feu". De toutes les montagnes voisines du Rhône, le bétail est obligé de descendre boire au fleuve. Dans le Lyonnais, on organise des processions blanches, ainsi appelés parce que les pèlerins qui y prenaient part étaient affublés d'un linceul blanc.
1513. - "L'été fut si sec qu'il fut trois mois sans pleuvoir."
1516. - "Les chaleurs de l'été assèchent presque complètement les rivières de l'Est.
1518. - "Le pays chartain fut menacé de stérilité par une sécheresse et une chaleur extraordinaires.
1534. - "La sécheresse contraint les moulin du Sud-Ouest à s'arrêter. En juin et en Juillet, la plupart des herbages et des vignes de cette région se trouvent grillés.
1536. - Sécheresse et grandes chaleurs en Bretagne durant tout le printemps et l'été : "la plupart des fontaines tarissent et les grosses rivières deviennent de faibles ruisseaux".
1540. - Par suite de sa chaleur remarquable dans toute la France, 1540 a été appelée par de nombreux chroniqueurs, soit la chaude année, soit l'année de la soilié (sécheresse). On moissonne en juin aussi bien en Bretagne que dans la Somme et en Lorraine; dans l'Est, les vendanges se font en août. On passe à pied sec toutes les rivières de l'Est, notamment le Doubs, et les moulins de la Garonne doivent s'arrêter, faute d'eau.
1545. - "Véhémentes chaleurs dans le Midi". Grande sécheresse dans le Vendômois où pendant sept mois il n'y eut aucune pluie.
1547. - Dans le Vendômois, chaleur comme on n'en avait encore jamais vu. "L'année susdite fut chaude à merveille à Bourges, tellement que depuis le mois de juillet jusqu'à la fin août on disait la grand-messe aux églises collégiales tout aussitôt après les matines, à cause des chaleurs, ce que je n'avais jamais vu faire."
1554. - "Dans le Berry furent faites plusieurs processions à cause de la grande sécheresse qu'il faisait, car il fut bien l'espace de sept mois sans pleuvoir." Pas de foin.
1556. - Grandes sécheresse et fortes chaleurs à peu près générales. Dans le Vendômois "la terre ne fut point trempée de Pâques jusqu'à la Toussaint; elle brûlait les pieds de ceux qui marchaient pieds nus." Aucune pluie ne tombe de mars à novembre dans la Loire et d'avril à octobre dans le Cher. Dans le Berry, on commence à moissonner les blés dès la fin de mai et à vendanger au début d'août.
1559. - On vendange en Lorraine dès la fin juillet.
1575. - Grande sécheresse dans le bassin de la Saône. Dans le vendômois "il ne plut point de la St-Jean jusqu'à la Toussaint et il fit toujours chaud".
1580. - Dans les régions méridionales, été chaud et sec auquel on attribua une maladie appelée "miquelle" (fièvre pendant plusieurs jours).
1599. - De fortes chaleurs survenues en Saintonge du 20 juin au 10 août permettent d'y terminer les vendanges à la mi-septembre. A Paris, le 5 août fut faite une procession générale à cause de la sécheresse.
1604. - Été et automne chauds et très secs dans l'Ouest.
1605. - La sécheresse est telle d'avril à septembre que "la plupart des rivières de France devinrent guéables.
1612. - "L'été fut si chaud, écrit un chroniqueur de la Saintonge, que la peau de mes bras et de ma poitrine a été toute brussolée." Ce même caractère de chaleur sèche est signalé dans le Nord comme ayant marqué les mois d'avril à juillet 1612.
1615. - Il n'y a eu dans l'Est aucune pluie importante, depuis Pâques jusqu'à la mi-septembre.
1619. - Il fit dans le Sud-Ouest "de si terribles chaleurs aux mois de juillet, août, et septembre 1619 que l'on ne pouvait demeurer ni dedans ni dehors et que les vignes et raisins se séchèrent.
1622. - Grande chaleur dans le Centre et l'Est. Des processions pour demander la pluie ont lieu durant le mois d'août.
1623. - Cinq semaines consécutives de fortes chaleurs dans l'Est et le Sud-Est. A Feurs, dans les derniers jours d'août, "la Loire n'avait plus que 33 pieds de large".

1636. - De Pâques à la fin de juin on ne compte dans la région parisienne que deux jours de pluie seulement.
1637. - Grande sécheresse d'avril à octobre dans le Centre et le Massif Central. On vendange dès le mois d'août à Bourges et à Orléans.
1652. - Sécheresse extrême dans le Nord et l'Est. Une procession générale a lieu à Amiens le 9 juin pour obtenir la fin de cette calamité.
1662. - Sécheresse très marquée dans tout le Nord. En de nombreuses localités de cette région, des prières publiques sont dites dans le courant de juin pour demander la pluie.
1666. - De la mi-juillet à la mi-août sévissent dans l'Est de fortes chaleurs "rôtissant et séchant les raisins".
1669. - Après un mois de juin extrêmement froid, juillet et août sont marqués par des chaleurs remarquables.
1676. - Aucune pluie ne tombe dans la Haute-Marne entre le 15 février et le début de novembre, sauf pendant une journée en juillet et une demi-journée en août. Cette sécheresse exceptionnelle tarit toutes les rivières et provoque la destruction d'un grand nombre de poissons.
1681. - "La sécheresse fut si grande et si générale dans toute la France qu'il n'y eut point de diocèse où les évêques et chapitres n'ordonnassent des prières publiques et des processions générales pour la conservation des biens de la terre."
- 1684 et 1685. - Forte sécheresse et grandes chaleurs dans le Centre et l'Est. "Pendant l'été de 1684, il a fait une si grande sécheresse que l'on n'a recueilli que fort peu de blé et grain de carême et quasi point de foin : jamais on n'a vu pareille sécheresse."
1691. - Année très sèche : à Paris il ne tombe que 391 millimètres d'eau. Dans le Nord, l'été est remarquablement chaud.
1698. - Sécheresse extraordinaire en Bourgogne; vin néanmoins assez abondant.
1704. - Sécheresse et chaleurs remarquables dans le Midi et dans l'Ouest. Dans la Beauce, de nombreux moissonneurs meurent frappés d'insolation.
1705. - L'été est si chaud que le 6 août les thermomètre de Cassini et de la Hire sont brisés par la dilatation du liquide. Dans le Midi, "chaleur intolérable" : à Montpellier, la chaleur égalait celle qui sort du four d'une verrerie et on y faisait cuire des oeufs au soleil.
1706. - Été très chaud et très sec dans le Nord.
1707. - Les chaleurs sont si fortes dans l'Ouest "au temps des faucheriers de foin que non seulement des personnes en meurent mais même des bêtes". Le 19 juillet ceux qui étaient dans le coche comptèrent 14 chevaux morts de chaleur sur le pavé entre Etampes et Orléans.
1712. - Été très chaud à Paris. Chaleur et grande sécheresse dans le Midi.
- 1717 et 1718. - Années chaudes et très sèches. En 1718, dans l'Est, le chasselas était déjà mûr le 24 juillet.
1719. - Une des années les plus sèches et les plus chaudes qu'on ait encore vu en France. De nombreux puits sont taris. Les récoltes sont très faibles, sauf pour la vignes. Dans l'Est, "la terre desséchée est comme de la cendre et les grains brûlent sur pied". Dans le Centre, "pas de pluie du 25 mars au 1<sup>er</sup> novembre, sauf un orage le 24 juillet : les chaleurs excessives provoquent de nombreuses morts par flux de sang". La Seine atteint un niveau extrêmement bas, puisque dans tout le cours du XVIII<sup>ème</sup> siècle elle n'a présenté un niveau plus bas qu'en 1731, 1767 et 1778.
1723. - Sécheresse générale d'une durée de trois mois, qui provoque une grave disette de fourrage.
- 1726, 1729 et 1731. - Années généralement sèche dans toute la France, y compris le Midi. En 1731, il ne tombe à Paris que 1 millimètre d'eau en Mars et 6 millimètres en avril et pour obtenir la pluie nécessaire on découvre au début de mai la châsse de St-Geneviève; au mois de novembre de cette année le niveau de la Seine est de 13 cm plus bas qu'il ne l'était en 1719.
1736. - Grande sécheresse en Normandie : elle dure jusqu'à la Toussaint et rend impossible pendant tout le mois d'octobre les semailles de blé.
1741. - L'Archevêque de Paris prescrit des prières publiques et des processions pour obtenir la fin de la sécheresse qui sévit sur la région parisienne et dans le Centre.
- 1742 et 1743. - Sécheresse en Bretagne et dans le bassin de la Seine : en 1743 cette sécheresse s'étend à une grande partie de l'Europe occidentale.

1751. - Dans le Sud-Ouest "après un printemps dérangé et pluvieux il vint une sécheresse extraordinaire avec grandes chaleurs qui firent périr la récolte. Les herbages manquèrent. Ce fut une année des plus critiques et des plus disetteuses."

1757 et 1759. - Étés chauds et secs dans le Nord et l'Est. En Normandie, les mois de juin et juillet 1757 et ceux de juillet et d'août 1759 sont particulièrement chauds et secs. A Paris, on note des températures de 37,5°C les 14 et 20 juillet 1757.

1760. - La chaleur et la sécheresse de l'été fournissent en abondance blés, raisins et fruits.

1761,1765,1767,1772,1773 et 1783. - Sécheresse et chaleurs estivales dans l'Est et le Sud-Est. En 1767, les eaux de la Seine sont de 27 cm plus basses qu'en 1719. En 1772, dans le midi, "les maïs furent semés et récoltés sans pluie, ce qui donne à la sécheresse une durée d'environ six mois". A Paris, la température atteint 36°C dès le mois de juin. Le début de l'été 1783 est caractérisé par "des brouillards secs qui n'occasionnent pas de pluie" et que certains considèrent comme une suite de tremblement de terre de la Sicile et de la Calabre. Ces brouillards secs disparaissent vers la fin de juillet : dans les jours qui suivent leur disparition, la récolte de blé est très réduite par un échaudage général. Le temps sec se prolonge jusque vers la fin de l'année et "en décembre on nettoyait plus facilement les mares qu'on ne le fait ordinairement dans les plus longs jours".

1762, 1764, 1766, 1771, 1778 et 1784. - Étés secs dans le Centre et toutes les régions avoisinantes. On n'y observe, en général, aucune pluie de mars à août 1762, de la mi-mai au 10 août 1764, du 20 juillet au début de novembre 1766, de la fin de juin au commencement de septembre 1771, de la mi-juillet à la mi-septembre 1778.

En Bretagne, les chaleurs et la sécheresse de 1762 détruisent entièrement la récolte de blé noir. Dans le Midi, c'est en 1762 et 1771 que le manque d'eau se fait particulièrement sentir. En 1778, les chaleurs de l'été occasionnent dans l'Yonne de nombreuses maladies, et à Paris, la Seine est de 8 cm plus basse qu'elle ne l'était en 1719. En 1784 dans le Bourbonnais "sécheresse continuelle en sorte que tous les étangs, les sources et la plupart des puits étaient tarées et que l'on ne pouvait moudre qu'à bras".

1785. - Grande sécheresse dans toute la France. A Paris, le total de l'eau tombée du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai n'atteint que 21 millimètres. En Bretagne, aucune pluie notable n'est enregistrée "entre la Toussaint 1784 et la Madeleine 1785". Dans la Sarthe "les bestiaux se donnent; à peine peut-on se défaire des chevaux, car on les refuse à qui les donne pour rien. On ne parle que de chiens enragés; il en est tué une quantité prodigieuse". Il en est de même dans le Limousin où par suite du manque de foin, les paysans abandonnent tous leurs animaux. Dans l'Ain, la disette de fourrage oblige à nourrir les ânes avec des sarments coupés dans les vignes. Au mois de mai de cette année, "la livre de beurre vaut 20 sols dans la Sarthe, 36 sols en Ille-et-Vilaine et jusqu'à 48 sols à Bourges et à Issoudun".

1788. - Sécheresse dans le Sud-Ouest. Lord de sa séance du 14 mai 1788, le conseil de ville de Montauban décide d'écrire à l'évêque pour lui demander d'ordonner des prières publiques "afin d'obtenir du ciel la cessation de l'affreuse sécheresse qui règne depuis longtemps et expose les fruits de la terre aux plus grands dangers".

1790. - L'été et l'automne sont tellement secs dans la moitié Nord qu'en de nombreuses régions les vignes ne donnent presque rien; aussi le vin est-il "d'une cherté horrible, sans doute par une attention de la Providence qui a, par cette privation, arrêter et empêcher une partie des excès et des atrocités auxquels se seraient portées les têtes déjà exaltées par un patriotisme mal entendu, si à cette effervescence de l'esprit de parti se fut jointe la frénésie bachique".

1793. - Dans le Loiret, chaleurs excessives de la fin juin à la fin d'août : "les légumes séchaient sur leurs tiges, les fruits se consumaient sur les arbres, la viande se décomposait en moins d'une heure". En Champagne, chaleur et sécheresse caractérisent les mois de juillet à octobre. A Paris, on enregistre 38,4°C le 8 juillet et pendant toute cette année on ne recueille que 331 millimètres de pluie.

## **Annexe 4 : fiches d'essais du Logiciel GELSOL**

---

- fiche d'essai 001
- fiche d'essai 002
- fiche d'essai 003
- fiche d'essai 004
- fiche d'essai 005
- fiche d'essai 006
- fiche d'essai 010
- fiche d'essai 011
- fiche d'essai 101
- fiche d'essai 102
- fiche d'essai 103
- fiche d'essai 104
- fiche d'essai 104b
- fiche d'essai 105
- fiche d'essai 106
- fiche d'essai 107
- fiche d'essai 108
- fiche d'essai 109
- fiche d'essai 110

**fiche d'essai 001**

n° de l'essai : 001

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulairemaillage : mailleur interne au logiciel GELSOL

nombre de nœuds : 216

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	22
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	23
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0jour} = +5$   $T_{6jours} = -10$   $T_{86jours} = -10$   $T_{92jours} = +5$   
 alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$ 

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 304

---

**résultats**profondeur maximum de gel : 0,94 mdernière couche atteinte : terre végétaledurée de gel : 87 jourstempérature minimale en surface :  $-7,74 ^{\circ}C$ type de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 3 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil des températures en 4 instants

conclusions de l'essai : 1<sup>er</sup> essai réalisé.

### fiche d'essai 002

n° de l'essai : 002

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL

nombre de nœuds : 728

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	22
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	23
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure: température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure: flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 0,94 m

dernière couche atteinte : terre végétale

durée de gel : 87 jours

température minimale en surface :  $-7,74^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 7 points

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

profil horizontal des températures en 10 instants

isothermes en 10 instants

flux thermiques aux frontières en 10 instants

conclusions de l'essai : calculs plus précis que le 1<sup>er</sup> essai (plus de nœuds et pas de temps plus faible)

### fiche d'essai 003

n° de l'essai : 003

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL - triangles équilatéraux  
nombre de nœuds : 1288

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	10
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	10
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure: température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure: flux terrestre  $0,06 W/m^2$   
face droite : flux nul  
face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,40 m

dernière couche atteinte : concassé

durée de gel : 87 jours pour la terre végétale et 36 jours pour le concassé

température minimale en surface : - 8,37  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 7 points  
évolution de la profondeur de gel en fonction du temps  
profil vertical des températures en 10 instants

conclusions de l'essai : calculs plus précis que l'essai 001 et 002 (plus de nœuds, triangles équilatéraux), terrains superficiels plus secs entraînant un gel plus important.

## fiche d'essai 004

n° de l'essai : 004

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL - triangles équilatéraux  
nombre de nœuds : 1288

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	15
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	10
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure: température moyenne du sol en surface en °C  
 $T_{0\text{jour}} = +5$     $T_{6\text{jours}} = -8$     $T_{86\text{jours}} = -8$     $T_{92\text{jours}} = +5$

face inférieure: flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

## résultats

profondeur maximum de gel : 1,23 m

dernière couche atteinte : concassé

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale et 26 jours pour le concassé

température minimale en surface : - 8 °C

type de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

conclusions de l'essai : Conditions aux limites différentes de l'essai 003, terrains superficiels moins secs entraînant un gel moins important. La teneur en eau est un paramètre déterminant sur la profondeur de gel.

**fiche d'essai 005**

n° de l'essai : 005

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL - triangles équilatéraux  
nombre de nœuds : 1288

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	10
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	10
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure: température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{9\text{jours}} = -20$   $T_{45\text{jours}} = -20$   $T_{54\text{jours}} = +5$   
alpha : 6  
face inférieure: flux terrestre  $0,06 W/m^2$   
face droite : flux nul  
face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 540

---

**résultats**

profondeur maximum de gel : 1,45 m  
dernière couche atteinte : concassé

durée de gel : 50 jours pour la terre végétale et 23 jours pour le concassé

température minimale en surface : - 16,63  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 7 points  
évolution de la profondeur de gel en fonction du temps  
profil vertical des températures en 10 instants

conclusions de l'essai : Essai à comparer avec l'essai 003 car les matériaux sont identiques, seules les conditions sur la face supérieure sont différentes (gel plus court mais plus vif, même indice de gel). On observe que la profondeur de gel est identique à celle de l'essai 003.

**fiche d'essai 006**

n° de l'essai : 006

date du calcul : 24/05/95

forme du talus : rectangulairemaillage : mailleur interne au logiciel GELSOL - triangles équilatéraux  
nombre de nœuds : 1288caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	2	2	1720	10
concassé	0,5	3	3	1615	10
sable	0,3	3	3	1615	10
argile	1,5	2	2	1800	15
sable	0,2	3	3	1615	13
tout venant	2,3	2	2	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en °C  
 $T_{0\text{jour}} = +5$     $T_{6\text{jours}} = -10$     $T_{86\text{jours}} = -10$     $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre 0,06 W/m<sup>2</sup>

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

**résultats**profondeur maximum de gel : 1,63 mdernière couche atteinte : sabledurée de gel : 88 jours pour la terre végétale et 42 jours pour le concassé et 7 jours pour le sabletempérature minimale en surface : - 7,96 °Ctype de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

conclusions de l'essai : les conductivités thermiques sont très élevées dans cet essai, les terrains superficiels très secs entraînent un gel beaucoup plus important.

### fiche d'essai 010

n° de l'essai : 010

date du calcul : 31/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL

nombre de nœuds : 728

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	22
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	23
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$

$$T_{0\text{jour}} = +5 \quad T_{6\text{jours}} = -10 \quad T_{86\text{jours}} = -10 \quad T_{92\text{jours}} = +5$$

alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $5 W/m^2$  (valeur très forte et irréaliste)

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 0,94 m

dernière couche atteinte : terre végétale

durée de gel : 87 jours

température minimale en surface :  $-7,77^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 7 points

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

profil horizontal des températures en 10 instants

isothermes en 10 instants

flux thermiques aux frontières en 10 instants

conclusions de l'essai : Le flux terrestre est effectivement pris en compte dans les calculs, on peut le vérifier sur les graphiques.

### fiche d'essai 011

n° de l'essai : 011

date du calcul : 31/05/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL - triangles équilatéraux  
nombre de nœuds : 1288

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	2,3	2,3	2,8	2012	9,6

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,74 m

dernière couche atteinte : sable

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale et 55 jours pour le concassé et 9 jours pour le sable

température minimale en surface : - 8,57  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

dessin du maillage

conclusions de l'essai : les conductivités thermiques sont très élevées dans cet essai, les terrains superficiels très secs entraînent un gel important. Ces conductivités contrastées doivent être assez proches des conductivités réelles.

### fiche d'essai 101

n° de l'essai : 101

date du calcul : 07/07/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur interne au logiciel GELSOL toutefois le fichier contenant le maillage est utilisé comme si celui-ci avait été créé par un autre mailleur.

nombre de nœuds : 728

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	22
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	23
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$

$$T_{0\text{jour}} = +5 \quad T_{6\text{jours}} = -10 \quad T_{86\text{jours}} = -10 \quad T_{92\text{jours}} = +5$$

alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 0,94 m

dernière couche atteinte : terre végétale

durée de gel : 87 jours

température minimale en surface :  $-7,74^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 7 points

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

profil horizontal des températures en 10 instants

isothermes en 10 instants

flux thermiques aux frontières en 10 instants

conclusions de l'essai : Les résultats sont strictement identiques aux résultats de l'essai 002.

## fiche d'essai 102

n° de l'essai : 102

date du calcul : 07/07/95

forme du talus : rectangulaire

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL, on crée le maillage avec MAX2D pré-processeur de CESAR.

nombre de nœuds : voisin de celui de l'essai 002 et 101

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	1,0	1,7	1,5	1720	22
concassé	0,5	1,5	1,3	1615	23
sable	0,3	1,5	1,3	1615	23
argile	1,5	1,8	1,7	1800	17
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	2,3	1,7	1,5	1720	15

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

## résultats

profondeur maximum de gel : 0,94 m

dernière couche atteinte : terre végétale

durée de gel : 88 jours

température minimale en surface :  $-7,75 ^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 7 points

évolution de la température en fonction du temps en 7 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

profil horizontal des températures en 10 instants

isothermes en 10 instants

flux thermiques aux frontières en 10 instants

conclusions de l'essai : Les courbes sont quasi-identiques à celles de l'essai 101, et le fait que le maillage soit un peu plus fin explique sûrement la différence.

### fiche d'essai 103

n° de l'essai : 103

date du calcul : 19/07/95

forme du talus : trapézoïdale

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, triangle à trois nœuds  
nombre de nœuds : nettement inférieur à l'intérieur du massif que sur les limites

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	1,7	1,5	1720	22
mélange argileux concassé	0,8	1,7	1,5	1720	22
sable	0,5	1,5	1,3	1615	23
argile	0,3	1,5	1,3	1615	23
sable	1,5	1,8	1,7	1800	17
argile	0,2	1,5	1,3	1615	23
sable	0,2	1,5	1,3	1615	23
tout venant	0,3 à 2,3	1,7	1,5	1720	15
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448 (temps de calcul 15 minutes)

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1 m  
dernière couche atteinte : tout-venant

durée de gel : 87 jours pour la terre végétale et 77 jours pour le tout-venant.

température minimale en surface :  $-7,66^{\circ}C$

type de résultat graphique :

- évolution de la température en fonction du temps en 7 points
- évolution de la profondeur de gel en fonction du temps
- profil vertical des températures en 10 instants
- profil horizontal des températures en 10 instants
- flux thermiques aux limites en 10 instants
- isothermes en 10 instants
- dessin du maillage

conclusions de l'essai : 1<sup>er</sup> essai sur une structure en pente, on a modélisé tout un pan du centre de stockage ( 25 m de longueur).

### fiche d'essai 104

n° de l'essai : 104

date du calcul : 19/07/95

forme du talus : trapézoïdale

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, triangle à trois nœuds  
nombre de nœuds : nettement inférieur à l'intérieur du massif que sur les limites

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux concassé	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
sable	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
argile	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
sable	1,5	1,7	1,9	1923	12
argile	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448 (temps de calcul 15 minutes)

#### résultats

profondeur maximum de gel : 1,46 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 82 jours pour le tout-venant, 53 jours pour le concassé et 19 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,5  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

- évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points
- évolution de la température en fonction du temps en 9 points
- évolution de la profondeur de gel en fonction du temps
- profil vertical des températures en 10 instants
- profil horizontal des températures en 10 instants
- flux thermiques aux limites en 10 instants
- isothermes en 10 instants
- dessin du maillage

conclusions de l'essai : On a modélisé tout un pan du centre de stockage (25 m de longueur), ici les conductivités sont plus importantes et le gel plus profond.

### fiche d'essai 104b

n° de l'essai : 104b

date du calcul : 19/07/95

forme du talus : trapézoïdale

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, triangle à trois nœuds  
nombre de nœuds : nettement inférieur à l'intérieur du massif que sur les limites

caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$   
face droite : flux nul  
face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 668 (temps de calcul 35 minutes)

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,46 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 82 jours pour le tout-venant, 53 jours pour le concassé et 19 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,5  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points  
évolution de la température en fonction du temps en 9 points  
évolution de la profondeur de gel en fonction du temps  
dessin du maillage

conclusions de l'essai : On a modélisé tout un pan du centre de stockage (25 m de longueur), suite au maillage grossier, les courbes sont irrégulières et ont des sauts marqués.

### fiche d'essai 105

n° de l'essai : 105

date du calcul : 19/07/95 au 20/07/95

forme du talus : trapézoïdale

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1938 nœuds pour 3700 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$

$$T_{0\text{jour}} = +5 \quad T_{6\text{jours}} = -10 \quad T_{86\text{jours}} = -10 \quad T_{92\text{jours}} = +5$$

alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448 (temps de calcul 8 heures)

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,46 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 82 jours pour le tout-venant, 53 jours pour le concassé et 19 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,5  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points

évolution de la température en fonction du temps en 9 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

flux thermiques aux limites en 10 instants

isothermes en 10 instants

dessin du maillage

conclusions de l'essai : le temps de calcul devient trop important, il faut réduire les dimensions du modèle.

### fiche d'essai 106

n° de l'essai : 106

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte.

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds pour 2400 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$     $T_{6\text{jours}} = -10$     $T_{86\text{jours}} = -10$     $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448 (temps de calcul 1 heures)

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,74 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 81 jours pour le tout-venant, 52 jours pour le concassé et 18 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,58  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

- évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points
- évolution de la température en fonction du temps en 9 points
- évolution de la profondeur de gel en fonction du temps
- profil vertical des températures en 10 instants
- flux thermiques aux limites en 10 instants
- isothermes en 10 instants
- dessin du maillage

conclusions de l'essai : c'est la modélisation millennale sèche.

### fiche d'essai 107

n° de l'essai : 107

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte.

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds pour 2400 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux concassé	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
sable	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
argile	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
sable	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{41\text{jours}} = -10$   $T_{47\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 428 (temps de calcul 50 minutes)

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,16 m

dernière couche atteinte : concassé

durée de gel : 47 jours pour la terre végétale, 37 jours pour le tout-venant, 8 jours pour le concassé.

température minimale en surface : - 6,89  $^{\circ}C$

#### type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points

évolution de la température en fonction du temps en 9 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

flux thermiques aux limites en 10 instants

isothermes en 10 instants

dessin du maillage

conclusions de l'essai : c'est la modélisation centennale sèche.

### fiche d'essai 108

n° de l'essai : 108

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte.

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds pour 2400 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{16\text{jours}} = -10$   $T_{22\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 368 (temps de calcul 40 minutes)

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 0,49 m

dernière couche atteinte : tout-venant

durée de gel : 16 jours pour la terre végétale, 12 jours pour le tout-venant

température minimale en surface :  $-4,88^{\circ}C$

type de résultat graphique :

- évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points
- évolution de la température en fonction du temps en 9 points
- évolution de la profondeur de gel en fonction du temps
- profil vertical des températures en 10 instants
- flux thermiques aux limites en 10 instants
- isothermes en 10 instants
- dessin du maillage

conclusions de l'essai : c'est la modélisation décennale sèche.

### fiche d'essai 109

n° de l'essai : 109

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte.

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds pour 2400 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$   
 $T_{0\text{jour}} = +5$   $T_{6\text{jours}} = -10$   $T_{86\text{jours}} = -10$   $T_{92\text{jours}} = +5$   
alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,66 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 81 jours pour le tout-venant, 53 jours pour le concassé et 18 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,57  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points

évolution de la température en fonction du temps en 9 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

flux thermiques aux limites en 10 instants

isothermes en 10 instants

dessin du maillage

conclusions de l'essai : la position du profil a changé, celui qui est considéré ici est à l'aval du profil médian.

### fiche d'essai 110

n° de l'essai : 110

date du calcul : 27/07/95

forme du talus : trapézoïdale seule la moitié interne du talus est prise en compte.

maillage : mailleur externe au logiciel GELSOL - César, quadrilatères coupés en deux par un programme intermédiaire.

nombre de nœuds : 1271 nœuds et 2400 triangles

#### caractéristiques des couches :

matériaux	épaisseur en m	$\lambda$ non gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\lambda$ gelé en $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$\rho$ en $kg.m^{-3}$	w en %
terre végétale	0,2	2,0	2,2	2012	10
mélange argileux	0,8	2,3	2,8	2012	9,6
concassé	0,5	0,7	0,8	1240	5,0
sable	0,3	3,2	3,5	2188	6,4
argile	1,5	1,7	1,9	1923	12
sable	0,2	3,2	3,5	2188	6,4
tout venant	0,3 à 2,3	2,3	2,8	2012	9,6
béton	8	1,4	1,4	2250	10

#### conditions aux limites :

face supérieure : température moyenne de l'air en  $^{\circ}C$

$$T_{0\text{jour}} = +5 \quad T_{6\text{jours}} = -10 \quad T_{86\text{jours}} = -10 \quad T_{92\text{jours}} = +5$$

alpha : 6

face inférieure : flux terrestre  $0,06 W/m^2$

face droite : flux nul

face gauche : flux nul

nombre de pas de temps : 448

---

### résultats

profondeur maximum de gel : 1,66 m

dernière couche atteinte : sable (au dessus de l'argile)

durée de gel : 88 jours pour la terre végétale, 81 jours pour le tout-venant, 53 jours pour le concassé et 18 jours pour le sable.

température minimale en surface : - 8,57  $^{\circ}C$

type de résultat graphique :

évolution de l'indice de gel en fonction du temps en 9 points

évolution de la température en fonction du temps en 9 points

évolution de la profondeur de gel en fonction du temps

profil vertical des températures en 10 instants

flux thermiques aux limites en 10 instants

isothermes en 10 instants

dessin du maillage

conclusions de l'essai : la position du profil a changé, celui qui est considéré ici est à l'amont du profil médian. Les résultats des essais 109 et 110 sont quasi-identiques l'épaisseur variable du tout-venant est sans effet vis à vis du gel.

## Annexe 5 : conductivités thermiques

d'après : « Mise hors gel des plates-formes ferroviaires » *document interne L.C.P.C.*

### Sols non saturés $S=0,8$

Sols fin : argiles limons  $\gamma_s = 2,7$

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=2,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
6,4	2,222	0,177	1,8	2,6	1,9	2,2
9,6	2,041	0,244	1,8	2,1	1,7	2,1
12	1,923	0,288	1,7	1,9	1,6	2,0
20	1,613	0,403	1,4	1,8	1,3	1,8
32	1,299	0,519	1,1	1,8	1,1	1,7

### Sols grenus : sables $\gamma_s = 2,65$

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=4,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
6,4	2,188	0,174	3,2	3,5	3,0	3,5
9,6	2,012	0,241	2,8	3,5	2,7	2,13,2
12	1,898	0,284	2,5	3,3	2,5	3,1
20	1,595	0,398	1,8	2,8	2,0	2,7
32	1,287	0,514	1,3	2,3	1,6	2,3

### Sols « moyens » $\gamma_s = 2,65$

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=3,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
6,4	2,188	0,174	2,5	3,0	2,5	2,9
9,6	2,012	0,241	2,3	2,8	2,2	2,7
12	1,898	0,284	2,1	2,6	2,0	2,6
20	1,595	0,398	1,6	2,3	1,6	2,3
32	1,287	0,514	1,2	2,1	1,3	2,0

## Sols saturés

Sols fin : argiles limons  $\gamma_s$  des particules = 2,7

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=2,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
8	2,222	0,177	2,1	2,8	2,1	2,7
12	2,041	0,244	2,0	2,4	1,9	2,6
15	1,923	0,288	1,9	2,3	1,8	2,6
25	1,613	0,403	1,5	2,2	1,5	2,6
40	1,299	0,519	1,1	2,3	1,3	2,5

Sols grenus : sables  $\gamma_s = 2,65$

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=4,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
8	2,188	0,174	3,4	4,3	3,3	4,2
12	2,012	0,241	2,9	4,2	2,9	4,0
15	1,898	0,284	2,7	4,1	2,7	3,9
25	1,595	0,398	1,9	3,5	2,2	3,6
40	1,287	0,514	1,4	2,8	1,8	3,3

Sols « moyens »  $\gamma_s = 2,65$

W en %	$\gamma_d$	n	Kersten		Mickley $\lambda_s \text{ part}=3,8$	
			$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé	$\lambda$ non gelé	$\lambda$ gelé
8	2,188	0,174	2,7	3,5	2,7	3,5
12	2,012	0,241	2,5	3,3	2,4	3,4
15	1,898	0,284	2,3	3,2	2,3	3,3
25	1,595	0,398	1,7	2,8	1,9	3,1
40	1,287	0,514	1,3	2,6	1,6	2,9