

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE L'HYDRAULIQUE
ENSH-BLIDA**

ARBAOUI Abdallah

**DÉPARTEMENT GENIE DE L'EAU
MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**OPTION : CONCEPTION D'UN SYSTÈME
D'IRRIGATION ET DU DRAINAGE**

THÈME :

**ÉLABORATION D'UN PROGRAMME DE CALCUL
POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN RÉSEAU
DU DRAINAGE ET D'ASSAINISSEMENT AGRICOLE.**

PRÉSENTÉ PAR :
M^r HOCINI Tarek

PROMOTRICE:
M^{me}:L.S.BAHBOUH

Président : M^r B.BENLAOUKLI

**Examineurs : M^{me} W.AZIEZ
M^{me} D.DJOUJAR
M^r R.REKROUK
M^r D.KOLAI**

Octobre 2011

Remerciements

- *Je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour m'avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions*
- *Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à M^{me} L.S.BAHBOUH (ma promotrice).*
- *Je remercie le président et les membres du jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.*
- *Je voudrais aussi remercier l'ensemble des professeurs, la direction de l'école et le ministère de tutelle pour avoir veillé à notre formation.*
- *Un remerciement particulier à tous les travailleurs de la bibliothèque de l'ENSH surtout : Sabrina.*
- *Un grand merci pour toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*

..... HOCINI Tarek,2011.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à tous ceux que j'aime mais surtout :

À mes parents qui ont toujours été les étoiles de mon ciel et ont illuminés mon chemin depuis ma naissance, je ne les remercierai jamais assez (maman et papa que Dieu me les garde);

À mes grandes mères maternelle et paternelle qu'ALLAH les préserve ;

À mes frères ; Mohamed, Taha, Elhocine, Radouane, Ibrahim ;

À mes sœurs ;

À mes tantes ;

À mes oncles et tous mes cousins et surtout ;Attia

À tous mes enseignants particulièrement L.S.BAHBOUH

À mes amis les ingénieurs d'état G .Farid, L.Mohamed, B.Kamal,

Aux médecins : Sayeh ; Yahia Cherif ; Touati ;Bouzemlal ;Rabouh ; Bedja .

À toute ma promotion 2011 sans exception ;

Aux étudiants de l'ENSH qui m'ont accompagné durant mes études ;

À toute personne utilisant ce document pour un bon usage.

HOCINI Tarek

ملخص:

إن تقدير الأبعاد لشبكة صرف المياه يتطلب عددا كبيرا من الخصائص المتعلقة بالمناخ، النبات والتربة. كما أن المعادلات التي تسمح بتقدير تلك الأبعاد تتغير بتغير معدل جريان المياه داخل التربة و نظرا لصعوبة حل هذه المعادلات بالطرق التقليدية فقد قررنا القيام بدراسة الهدف منها هو انجاز برنامج معلوماتي يساعد في تقدير أبعاد شبكة صرف المياه آخذين بعين الاعتبار مختلف المتغيرات الخاصة بها .

Résumé :

Le dimensionnement d'un réseau de drainage, demande la connaissance, d'un nombre important de paramètres et caractéristiques liés au climat, sol et plante.

Les équations permettant le calcul d'un tel réseau varient aussi en fonction du régime d'écoulement de l'eau dans ce sol.

Aussi il est difficile de résoudre manuellement toutes ces équations.

Le but de cette étude est donc d'élaborer un programme de calcul permettant de dimensionner un réseau de drainage en tenant compte de différentes variables nécessaires à tel calcul.

Abstract:

The dimensioning of a network of drainage requires knowledge, of a big number of parameters and characteristics related to the climate, ground and plant.

The equations allowing the calculation of such a network also vary according to the mode of water run-off in this ground.

Also it is difficult to solve all these equations manually.

The goal of this study is thus to work out a calculation programmer making it possible to dimension a network of drainage by taking account of different variables necessary to such calculation

Sommaire

Chapitre I : CYCLE DE L'EAU

I.1- LE CYCLE DE L'EAU :.....	1
I.1.1- L'EAU SUR LA TERRE :.....	1
I.1.2- Le CYCLE DE L'EAU :.....	2
I.2- Les différentes sources d'eau :.....	3
I.2.1 Les eaux de surface :.....	3
I.2.2- Les eaux souterraines :.....	3

Chapitre II : L'EAU D'IRRIGATION

II.1- Introduction :.....	5
II.2- La qualité d'eau :.....	5
II.2.1- La qualité physique :.....	6
II.2.1.1- La température :.....	6
II.2.1.2- La turbidité :.....	6
II.2.2- Les différents paramètres définissant la qualité chimique de l'eau d'irrigation :.....	6
II.2.2.1- SALINITÉ :.....	6
II.2.2.2- SODIUM (Na ⁺) :.....	7
II.2.2.3- Détermination de risque lié au carbonate (résidu sec en carbonate) :.....	8
II.2.2.4- DURETÉ DE L'EAU :.....	9
II.2.2.5- ÉLÉMENTS TOXIQUES :.....	9
II.2.2.6- pH DE L'EAU D'IRRIGATION :.....	10
II.3- NORMES D'INTERPRÉTATION D'UNE ANALYSE D'EAU.....	10
II.3.1- Indexes d'appréciation du risque de salinisation par l'eau d'irrigation :.....	12
II.3.1.1- Risque salin : Conductivité électrique CE à 25 °C :.....	12
II.3.1.2- Risque alcalin :.....	12
II.3.2- Diagramme de classification des eaux d'irrigation de RIVERSIDE. (USSS) :.....	12
II.3.3- Évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation :.....	14
II.5- CONCLUSION.....	15

Chapitre III : ETUDE HYDROLOGIQUE

III.1- Les pluies :[4].....	16
III.2- Méthodes de calcul des probabilités de distribution des pluies :.....	16
III.2.1- Critères de choix d'une loi :.....	16
III.2.2- Le déroulement de l'ajustement :.....	16
III.3- Présentation des lois de probabilité de Gauss, de Galton et de Gumbel :.....	17
III.3.1- Loi normale ou loi de Gauss :.....	17
III.3.2- Loi du log normal ou loi de Galton :.....	19

Sommaire

III.3.3-Loi du log normal ou loi de Gumbel :	20
III.3.3.1-Estimation des paramètres :	20
III.3.3.2-Estimation de quantile :	20
III.3.3.3.Vérification de la linéarité de l'échantillon et l'adéquation de la fonction de probabilité :	21
III.4.Calcul du coefficient de corrélation :	21
III.4.1-Interprétation du résultat :	21
III.5-Test d'adéquation de Pearson III :	22
III.5.1) Procédé du calcul du test de Pearson III :	22
Chapitre IV: LA RECUPERATION DES SOLS SALINS	
IV.1- INTRODUCTION.....	24
IV.1- Salinité:.....	24
IV.1.1-Définition de la salinité:	24
IV.1.2- Origine de la salinisation des sols :	24
IV.1.3-Type de salinisation : [3].	25
IV.1.4- Effet du climat sur la salinité :	25
IV.1.5-Effet de la topographie et caractéristiques du sol sur la salinité :	25
IV.1.6- Manifestation de la salinité :	25
IV.1.7- Mesure de la salinité du sol :	26
IV.1.7.1-Mesure au laboratoire :	26
IV.1.7.2-Mesures sur site :	26
IV.2- Alcalinité du sol [2].....	27
IV.3- CLASSIFICATIONS DES SOLS SALINS :	27
IV.3.1 La classification française :	28
IV.3.1.1-Les sols salins non alcalins ($CE > 4$ mmho/cm et $ESP < 15\%$):	28
IV.3.1.2- Les sols alcalins non salins ($CE < 4$ mmho/cm et $ESP > 15\%$) :	28
IV.3.1.3-Les sols alcalins et salin ($CE > 4$ mmho/cm et $ESP > 15\%$) :	28
IV.3.2- La classification russe : [16].....	28
IV.3.2.1- Les Solontchaks :	28
IV.3.2.2- Les solonetz :	29
IV.3.2.3 Les solods :	29
IV.3.3La classification de la FAO :[2].....	29
IV.4- Le lessivage	30
IV.4.1-La dose de lessivage (LR)[3].....	30
IV.4.1.1-Le bilan salin.	30

Sommaire

IV.4.1.2. Méthode traditionnelle :	31
IV.4.1.3- Nouvelle conception [19]	32
IV.4.1.4- Formule de BERNSTEIN :	33
IV.4.1.5- Formule de RHOADS :	33
IV.4.2- La notion de l'efficacité de lessivage.	33
IV.5- Détermination du volume d'eau à apporter : [2]	34
IV.6- INTENSITÉ DU LESSIVAGE :	34
IV.7- LESSIVAGE CAPITALE. [16]	34
IV.8- Conclusion	35

Chapitre V: L'EXCES D'EAU

V.1.1- Introduction :	36
V.1.2- Différents états de l'eau dans le sol :	36
V.1.3- Bases théoriques :	37
V.1.3.1- Stock d'eau et teneur en eau :	38
Teneur en eau massique ou pondérale :	38
Teneur en eau volumique :	38
V.1.3.2- Porosité n :	38
V.1.3.3- Stock d'eau :	39
V.1.3.4- Potentiel de l'eau :	39
V.1.3.4.1- Le potentiel total de l'eau Ψ_t :	40
V.1.3.4.2- Unités :	40
V.1.3.4.3- Composantes du potentiel de l'eau dans un sol :	40
V.2.1- Les cause :	42
V.2.2- Le constat d'excès d'eau :	43
V.2.3- Manifestation d'excès d'eau :	43
V.2.4- Lutte contre l'excès d'eau en fonction de la nature du sol :	44
V.2.4.1- Sols à Gley et sols à tourbe :	44
V.2.4.2- Sols à pseudo-Gley:	44
V.2.4.3- Sols à saturation capillaire prolongée :	45
V.3- Objectifs du drainage en fonction du contexte climatique :	45

Chapitre VI: DRAINAGE

VI.1- Introduction :	46
VI.2- Situation du drainage agricole dans le monde :	46
VI.3- Principaux modes du drainage :	47
VI.3.1- Drainage De surface :	49

Sommaire

VI.3.1.1- Définition :	49
VI.3.1.2- OBJECTIFS DU DRAINAGE DE SURFACE :	49
VI.3.1.3- MÉTHODES D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉES :	49
VI.3.2- Drainage Souterrain :	50
VI.3.3- Drainage Par fossé :	52
VI.3.3.1- Les avantages :	52
VI.3.3.2- Les inconvénients :	52
VI.3.4- Fossés remblayés :	52
VI.3.5- Par drain enterré :	53
VI.3.6- Puits du drainage :	53
VI.4- Le dimensionnement du réseau du drainage :	53
VI.4.1- Les critères du dimensionnement :	53
VI.4.1.1- Critère agronomique :	54
VI.4.1.2- Profondeur optimale de la nappe :	54
VI.4.1.3- Notion du régime permanent et du régime variable du tarissement :	56
VI.4.1.4- Profondeur du placement des drains :	56
VI.4.1.5- Caractéristiques des sols :	57
VI.4.1.6- Profondeur de la couche imperméable :	57
VI.4.1.7- Topographie :	57
VI.4.1.8- Coût de l'installation :	57
VI.4.2- Dimensionnement :	57
VI.4.2.1- La pluie :	58
VI.4.2.2- Débit caractéristique :	60
VI.4.2.2- Irrigation [12] :	61
VI.4.2.3- Lessivage :	64

Chapitre VII: L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

VII.1- Introduction :	66
VII.2- Écoulement souterrain en drainage :	66
VII.3- L'équation HOOGHOUDT :	66
VII.4- L'équation De `ERNST :	73
VII.4.2- Écoulement horizontal :	74
VII.4.3- Écoulement radial :	75
VII.4.4. Discussion sur l'état d'équilibre des équations :	76
VII.4.4.1- Sol homogène :	76
VII.4.4.2- Profil des sols à deux couches :	78
VII.5- L'équation GLOVER-DUMM :	80

Sommaire

Chapitre VIII: PROGRAMMATION

VIII.1- Introduction :	84
VIII.2Composition du programme :	84
VIII.3- NOTION D'ALGORITHME :	84
VIII.3- MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION D'UN ALGORITHME :	85
VIII.4- Notion d'organigramme :	85
VIII.5.1- Éléments constitutifs d'un organigramme :	85
VIII.5.2-Symboles :	85
VIII.5.3-Différentes structures :	86
VIII.6- Organigramme du fonctionnement de notre logiciel :	86
VIII.6-Définition d'un Vecteur :	86
VIII.7- Programmation :	86
VIII.7.1- Organigramme de détermination de la pluie de n jours :	86
VIII.7.2- Organigramme d'ajustement de la loi normale :	87
VIII.7.3- Organigramme d'ajustement de la loi log-normal :	88
VIII.7.4- Organigramme d'ajustement de la loi de Gumbel:	88
VIII.7.5- Autres organigramme :	88

Chapitre IX : APPLICATION

IX.1-PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA PLAINE DU MOYEN CHELIFF:	90
IX.2-CLIMATOLOGIE :	90
IX.2.1-La température :	90
IX.2.2-Les précipitations :	92
IX.3- CALASSIFICATION DU CLIMAT :	93
IX.3.1-Classification du climat selon l'indice de Marton :	93
IX.4-Description du périmètre :	95
IX.5-Traitement des données pluviométriques :	99
IX.5.1-Précipitation moyenne mensuelle :	99
IX.5.2-Précipitation du projet (ou année du calcul) :	99
IX.5.3-Etude hydrologique :	99
IX.5.4-Précipitation du projet :	101
IX.5.5-Calcul d'évaporation à partir de la série pluviométrique :	103
IX.5.6-Détermination de la pluie critique :	109
IX.5.7-Débit caractéristique en régime permanent sans stockage :	109
IX.5.8-Calcul du débit caractéristique en régime permanent avec stockage :	110
IX.5.9-En régime variable :	110

Liste des tableaux

Tableau II.1: Degré relatif de dureté de l'eau selon la quantité de carbonate de calcium.	9
Tableau II.2 : Norme d'interprétation d'une analyse d'eau pour la production de plantes annuelles	11
Tableau II.3 : Barème de qualité pour l'eau d'irrigation	11
Tableau II.4 : Classes du risque salin.[16]	12
Tableau II.5 : Classes du risque SAR.[16]	12
Tableau III.1 : Extrait de la table de χ^2	23
Tableau IV.1: Récapitulatif.	28
Tableau IV.2: classification des sols salés et leurs effets sur les cultures.	29
Tableau IV.3 : Lf en fonction du type du sol.	33
Tableau IV.4-: LES VALEURS DE α . [16]	35
Tableau 15.1:les unités du potentiel de l'eau :	40
Tableau VI.1: Différents aménagements possibles selon la pente	49
Tableau VI.2: Variation du rendement en fonction du niveau de la nappe.	55
Tableau VI.2: Profondeur optimum de la nappe en fonction de la culture et du type de sol.	55
Tableau VI.3 : Profondeurs des drains en fonction du type du sol et du type de culture.	56
Tableau VI-4 : Pertes d'eau à la parcelle.	
Table VIII.1 Values for équivalent dephe d of Hooghoudt for $r_0=0.1$ m ,D and L in m (hooghoudt 1940)	71
Table VIII.2 The geometry factor (a) obtained by the relaxation method (after Van BEERS 1979)	76
Tableau des Symboles de l'organigramme	85
Le tableau représente les différentes structures possibles	
Le Tableau VIII.1: Tableau récapitulatif.	89
Tableau IX.1 : Températures mensuelles et annuelles de CHLEF (°c) (Période : 1987-2008)	92
Tableau IX.1 : Série pluviométrique (station Ouled fares 1972–2009)	92
TABLEAU IX.2 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) Période (1972-2009)	93
Tableau IX.3: Classification du climat selon Marton.	93
Tableau IX.5 : Ajustement par la loi log-normal.	99
Tableau IX.6 : Valeurs qui correspondent aux $P_{80\%}$; $P_{50\%}$.	100
Tableau IX.7: Résultats de l'exécution de notre logiciel :	100
Tableau IX.8 : Valeurs correspondant aux $P_{80\%}$; $P_{50\%}$ à partir de notre logiciel :	
La précipitation du projet est donnée sur le Tableau IX.9 :	101
Tableaux IX.10 Résumé des caractéristiques de chaque zone :	102
Tableaux IX.11 : Évapotranspiration de référence.	103

Tableaux IX.12 : Résultats du 1 ^{ier} trimestre.	104
Tableaux IX.13 : Résultats du 2 ^{ième} trimestre.	105
Tableaux IX.14 : Résultats du 3 ^{ième} trimestre.	106
Tableaux IX.15 : Valeurs maximales journalières.	107
Tableaux IX.16 : Valeurs des pluies pour chaque type de culture.	109
Tableaux IX.17 : Valeurs nécessaires au calcul.	109
Tableaux IX.18 : Pluies critiques de chaque culture.	109
Tableaux IX.19 : Calcul du débit caractéristique en régime permanent avec stockage.	110
Tableaux IX.20 : Profondeur optimale.	110
Tableaux IX.21 : Valeurs de l'écartement obtenues à partir de notre logiciel de calcul :	111

Liste des figures

Figure I.1 : Eau sur la terre.	1
Figure I.2 : Cycle de l'eau.	
• À l'échelle globale.	2
• À l'échelle de bassin versant.	3
• À l'échelle locale.	4
Figure II.1 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation de RIVERSIDE(USSL).	12
Figure II.2 : Evaluation de la qualité de l'eau d'irrigation.	14
Figure V.1 : l'état de l'eau dans le sol.	37
Figure V.2:Variation du stockage d'eau dans le sol.	39
Figure V2: le potentielle de l'eau dans le sol	42
Figure VI.3 Différentes types des fossés et des canaux	48
Figure VI4 différentes types de drain annulée en matière plastique pvc	48
Figure VI.5 drainage vertical –puits absorbante	48
Figure VI.6:L'outil de sous solage.	50
Figure VI7:L'outil de drainage taupe.	51
Figure VI8:L'affait de drainage toupie.	51
Figure VI9 Réseau de drainage par fossé.	52
Figure VI10: Fossé gazonné52	52
Figure VII8-2 flow to vertically –walled drains reaching impervious layer	67
Figure VII8-3 the concept of the equivalent deph, d,to transform a combination of horizontal and radial flow (A) into an equivalent horizontal flow (B)	69
Figure VII8-5 drain pipe with gravel envelope in drain trench72	72
Figure VII8-6 Geometry of tow dimensional flow to wards drains according to Ernst73	73
Figure VII8-7 summary of the steady –state equation77	77

Figure VII8-8 Geometry of the ernst equation for a tow –layered soil with the drain in the botton layer (A) and in the top layer (B)	79
Figure VII8-12 Change in storage in a soil column under a falling watertable	80
Figure VII8-13 Boundary condition for the glover –dumm equation with a initially horizontal watertable	81
Figure IX1 : carte de situation du périmètre de moyenne Chélift	91
Figure IX2 :Climogramme de GAUSSEN	94
Figure IX3 : Diagramme bioclimatique d’EMBERGER	96
Figure IX1 : CARTE DE SITUATION DU PERIMETRE DE MOYENNE CHELLIF	91
Figure IX3 : Diagramme bioclimatique d’EMBERGER	96
Figure IX.4 : Carte pédologique de PMC	97
Figure IX5 : représentation visuelle de l’ajustement	102
Figure IX6 : Courbe H,D,F(1 ^{ier} T)	107
Figure IX7 : Courbe H,D,F(2 ^{ième} T)	108
Figure IX8 : Courbe H,D,F(3 ^{ième} T)	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Le dimensionnement d'un réseau de drainage est basé sur plusieurs hypothèses qui traduisent le phénomène physique en équations mathématiques.

Cette traduction a pour objectif de comprendre le comportement physique et le donner sous forme de chiffres et de graphiques d'une part, et d'autre part de comprendre le mécanisme de fonctionnement pour faciliter le contrôle et la gestion du système.

Mais ceci nécessite au préalable la détermination de plusieurs paramètres ainsi que leur mise en valeur nécessitant ainsi une succession d'étapes de calcul qui commencent par la reconnaissance de type de sol, la qualité de l'eau d'irrigation, les conditions climatiques, l'assolement à mettre en place etc.

L'objectif de ce travail est d'élaborer un code de calcul capable de remplacer le calcul manuel qui demande un temps important et qui présente certaines marges d'erreurs. Ce programme facilite la tâche et permet le contrôle et la gestion du réseau à chaque moment.

Ce code n'est en fait que la traduction des méthodes et formules de calcul par un programme informatique simple à utiliser et à optimiser la conception des réseaux de drainage.

Le choix du langage de programmation est arrêté sur « **Visual basic 6.4** » car il offre un espace de développement qui répondra parfaitement à toutes nos exigences aussi bien techniques qu'esthétique.

Ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres qui décriront successivement les critères de dimensionnement d'un réseau de drainage et le dimensionnement de ce réseau.

Partie Théorique

Chapitre I : CYCLE DE L'EAU

I.1- LE CYCLE DE L'EAU :

L'eau se trouve sur la terre sous forme de plusieurs états, mais d'où vient cette eau ?

I.1.1- L'EAU SUR LA TERRE :

Lors de sa formation, la terre, véritable boule en fusion, était entourée de gaz brûlants. En refroidissant, l'oxygène et l'hydrogène se sont combinés pour former de gigantesques nuages, Des pluies diluviennes se sont alors abattues sur la terre. Cela se passait il y a environ 3,7 milliards d'années. L'eau a ainsi recouvert presque les trois quarts de la planète.

Depuis, la quantité d'eau sur terre est constante.

- 99 % de l'eau de notre planète est salée ou glacée.

La quantité totale d'eau sur la terre est évaluée à environ 1400 milliards de milliards de litres. (Soit 1400 millions de km³)

- 97,5 % dans les océans et les mers.
- 1,8 % dans les banquises.
- 0,6 % dans les nappes souterraines.

Le restant se répartit en l'humidité contenue dans le sol, la vapeur d'eau dans l'atmosphère et l'eau contenue dans la matière vivante [11]

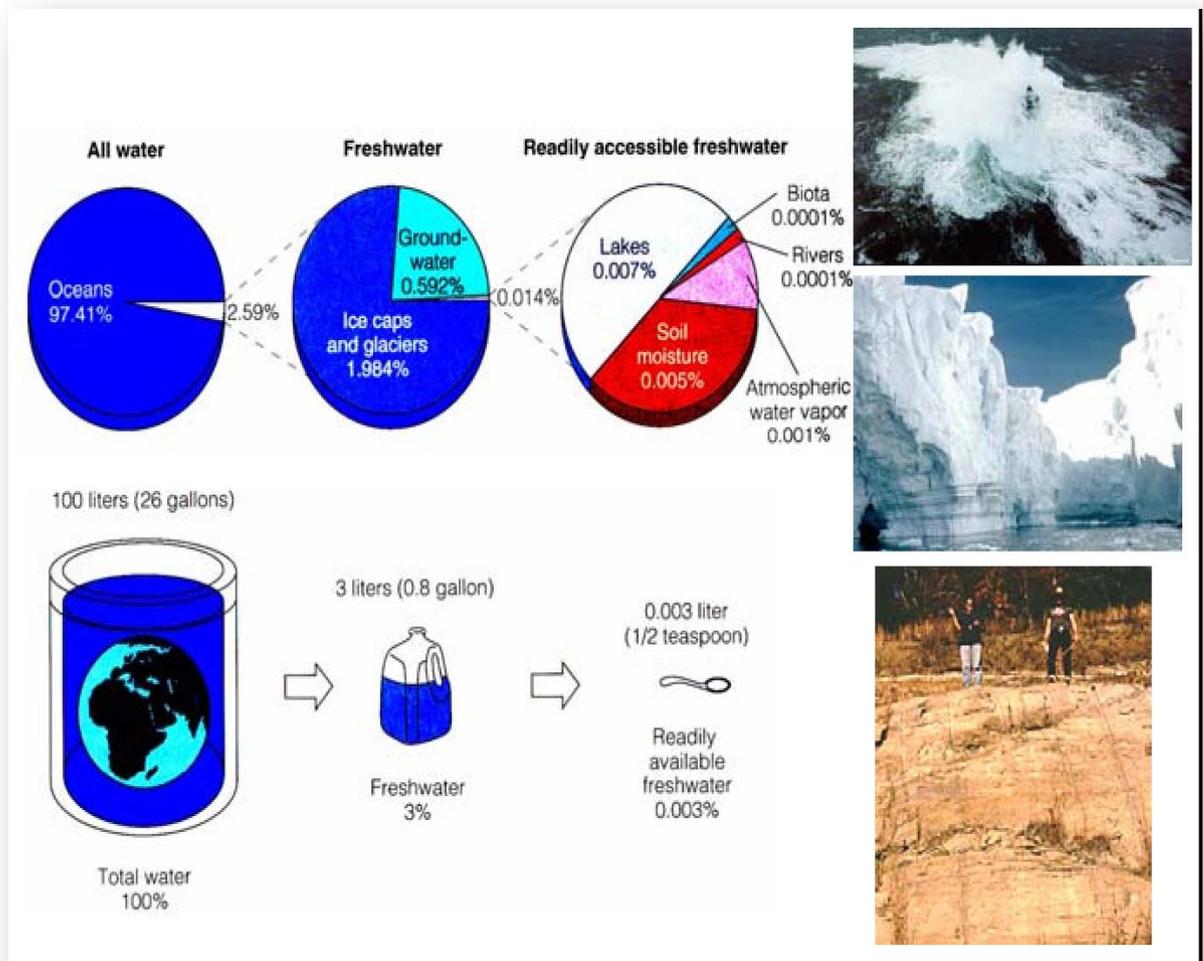


Figure I.1 : Eau sur la terre

I.1.2- Le CYCLE DE L'EAU :

Sur la planète bleue, l'eau est stockée sous quatre formes :

- Les océans et les mers.
- Les glaciers.
- Les eaux terrestres.
- L'atmosphère.

Ces formes communiquent entre elles au rythme du cycle de l'eau.

Sous l'effet du soleil, l'eau des océans, des cours d'eau, de la végétation, s'évapore (pour la végétation, on parle d'évapotranspiration) et devient de la vapeur d'eau qui forme les nuages. Cette vapeur d'eau, lorsqu'elle traverse des régions froides, se condense et retombe sur le sol sous forme de précipitations (pluie, grêle, neige). En arrivant sur le sol, 50 % de l'eau s'évapore immédiatement pour devenir nuage ou brouillard, 25 % de l'eau s'infiltrate dans le sol et alimente les nappes et rivières souterraines. Les 25 % restants ruissellent à la surface du sol et rejoignent les cours d'eau, les barrages, les lacs, les mers et les océans.

Le cycle de l'eau est une boucle qui continue indéfiniment. C'est pourquoi il est si important de considérer les ressources en eau comme un capital dont il faut prendre soin. Chaque fois qu'un point du cycle est pollué, c'est, au bout du compte, toute la chaîne de l'eau qui souffre.[11]

À l'échelle globale

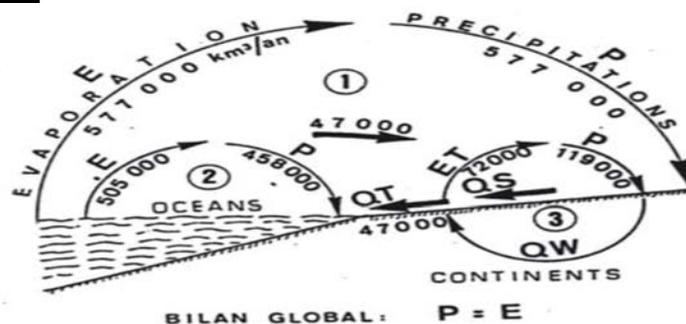


Figure 1 - Cycle de l'eau et quantités d'eau en mouvement en km³/an. Le cycle global (1) se subdivise en cycles de deuxième ordre, océanique (2) et continental (3). Des échanges de 47 000 km³/an équilibrent le bilan de ces deux cycles secondaires.

À l'échelle de bassin versant

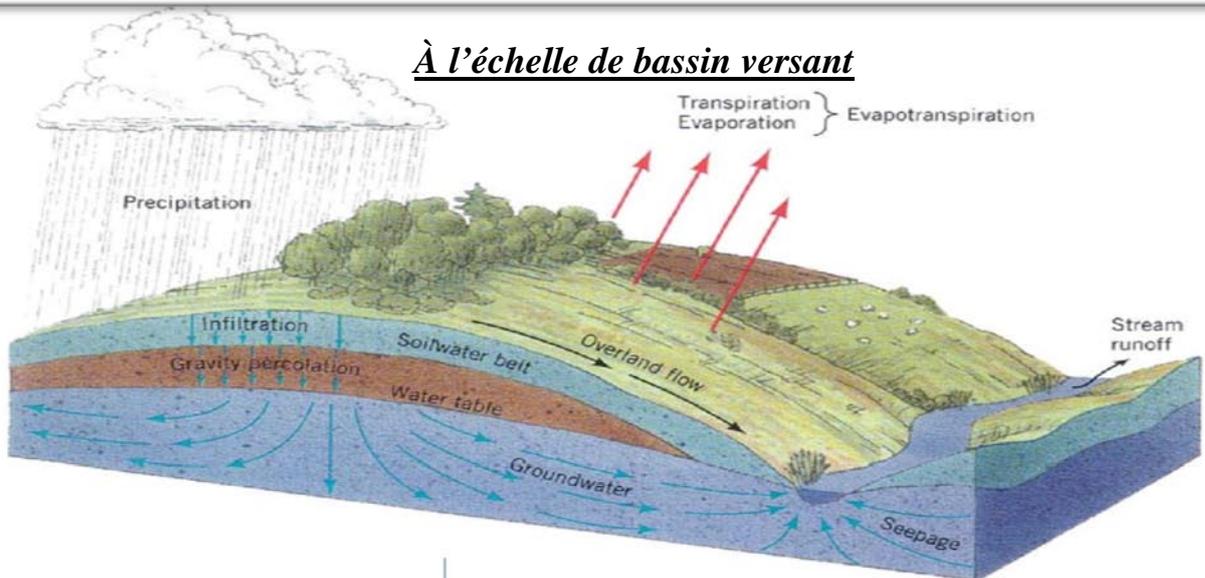


Figure I.2 : Cycle de l'eau

1.2- Les différentes sources d'eau :

Les ressources en eau ont deux origines (eau conventionnelle et eau non conventionnelle)
On traite dans ce chapitre les eaux conventionnelles :

1.2.1 Les eaux de surface :

Prises en rivière, barrages, retenues, sebkhas, lacs, mers et océans.

Ce sont des grands réservoirs naturels qui sont capables de stocker de grande quantité d'eau.

Mais cette eau reste en contact direct avec l'air qui peut provoquer des problèmes de pollution de cette dernière si cette source est proche des agglomérations. Par contre, une partie de l'eau qu'on utilise est plus conservée car elle est stockée dans une espace spécial que l'on appelle aquifère.[11]

1.2.2- Les eaux souterraines :

Nappes phréatiques, nappes profondes, représentent la partie de l'eau qui est emprisonnée dans les milieux poreux

L'eau pénètre dans le sol par infiltration, les zones de recharges peuvent être au voisinage directe de la nappe ou très loin de cette dernière.

L'écoulement souterrain est gouverné par les conditions existantes dans le milieu poreux, l'eau peut s'accumuler soit dans les interstices existantes entre les grains constituant le sol (sable, gravier...etc.), soit dans les fissures et crevasses des roches et des formations calcaires.

Dans les formations géologiques, on distingue trois types :

- Aquifère : Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capables de la restituer naturellement et/ou par exploitation.
- Aquitard : C'est une formation peu poreuse (argile, granite ou calcaire compactes) qui absorbe l'eau très lentement et qui ne la restitue pas assez facilement pour être exploitée par des puits ou naturellement par des sources.
- Aquiclude : Un aquiclude désigne une formation (au sens géologique du terme) relativement imperméable à l'eau (exemple une strate d'argile).

Comparé à un aquitard ; un aquiclude n'est pas transmissif.

A. **Nappe libre** (phréatique) : C'est une nappe où l'eau infiltrée est en contact direct avec l'atmosphère via une zone non saturée du sol.

B. **Nappe captive** : Une nappe captive est une nappe généralement profonde et située entre deux couches imperméables. Elle est entièrement saturée d'eau sous pression.

Elle jaillit lorsque l'on fait un forage et c'est ce qu'on appelle un puits artésien.

C. **Nappe perchée** : Les nappes perchées sont des zones saturées d'eau qui se trouvent dans la partie supérieure du profil du sol. Elle résulte de la présence d'une couche moins perméable sur laquelle l'eau s'accumule. [5]

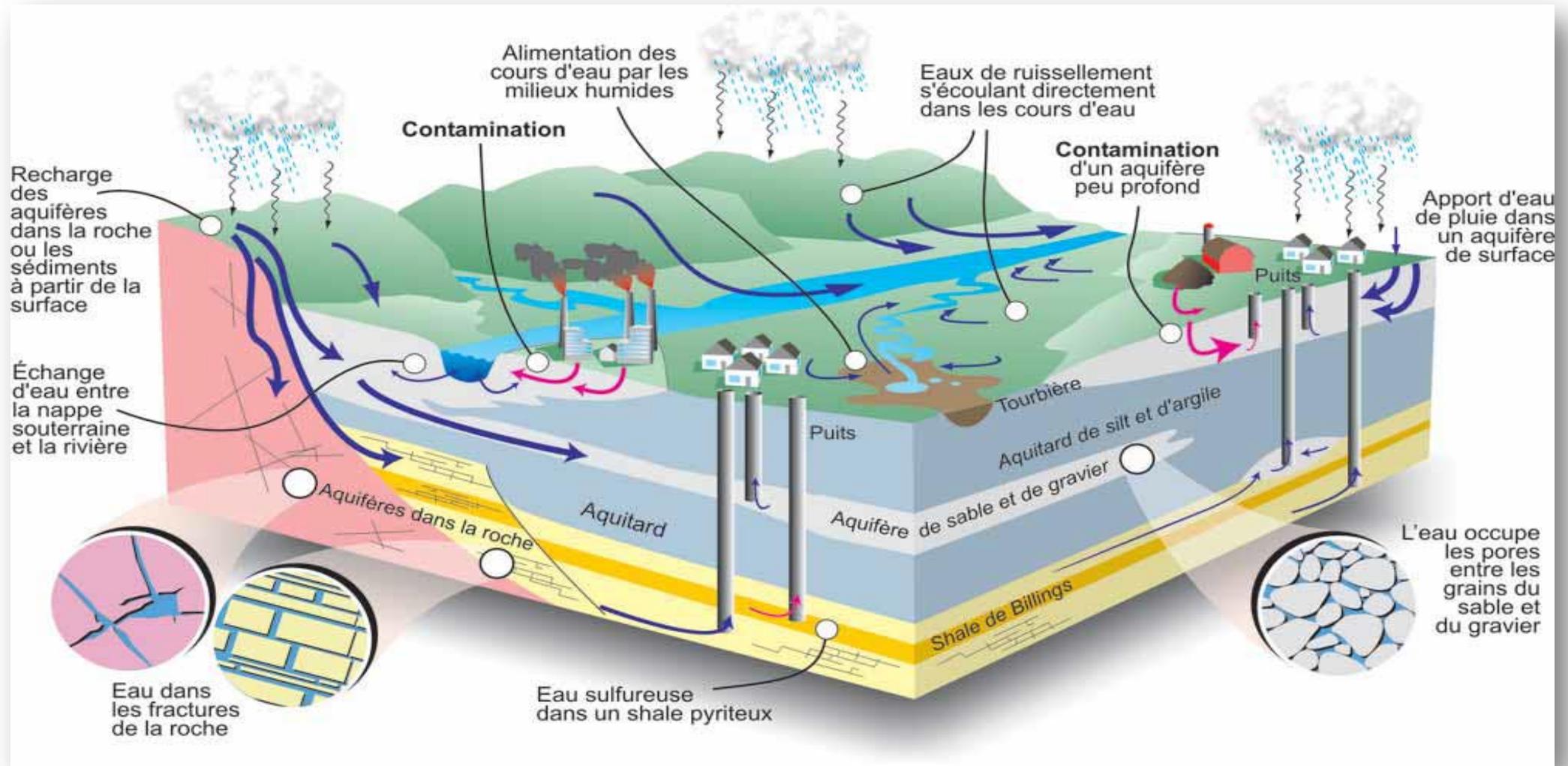


Figure I.2 : Cycle de l'eau à l'échelle locale

Chapitre II : L'EAU D'IRRIGATION

II.1- Introduction :

Face à l'augmentation prévisible de la superficie des terres irriguées sur la planète, le problème de la disponibilité en eau de qualité devient de plus en plus crucial. Le problème se pose sous les deux aspects, quantitatifs et qualitatifs, souvent interdépendants en zones arides et semi-arides. [8]

Quelles sont les ressources en eau dont on peut disposer l'agriculture sous ces climats, et de quelle nature sont-elles ?

Les eaux d'irrigation, qu'elles proviennent de sources, dérivées de cours d'eau ou qu'elles soient pompées dans des forages, contiennent d'appréciables quantités de substances chimiques en solution susceptibles de réduire les rendements des cultures et de détériorer la fertilité des sols en plus des sels dissouts, problème majeur récurrent depuis des siècles.[18]

L'eau d'irrigation transporte toujours des substances dérivées de son environnement naturel ou des déchets des activités humaines (effluents domestiques et industriels). Ces substances peuvent varier dans de larges mesures, mais se composent principalement d'impuretés et de matières solides en suspension qui provoquent le bouchage des distributeurs des systèmes de micro-irrigation par exemple, ou de populations bactériennes et de coliformes pouvant être dangereuses pour les humains et les animaux.[1]

Pour bien concevoir un projet d'irrigation ou du drainage, nous sommes amenés à étudier convenablement des variables multidimensionnelles, ces variables dépendent à la fois du type de culture, de son stade de développement, du sol et du climat avec tous ses paramètres mais surtout ceux relatifs à la température, à l'humidité relative, à l'ensoleillement et à la vitesse du vent.

Nous allons ci-après, étape par étape, faire le tour des différentes méthodes et paramètres nécessaires à la réalisation de cet objectif.[1]

Il est évident que la compréhension de chaque méthode est très utile afin de ne pas utiliser les instruments de travail dans un esprit de routine et d'éviter ainsi de tomber dans des conclusions abusives et des généralisations erronées.

II.2- La qualité d'eau :

Les recherches sur la quantité et la qualité de l'eau doivent se faire dans chaque cas, les débits, températures de l'eau, la turbidité, ... etc.

Ces paramètres ci-dessus seront mesurés pour juger la qualité de l'eau à la vue des résultats analytiques, il faut tenir compte non seulement des conditions météorologiques extrêmes (pluies orageuses, précipitations de longue durée, fonte de la neige, ... etc.), mais aussi de l'influence éventuelle de l'exploitation agricole du sol (engrais naturels et chimiques) dans le bassin d'alimentation, y compris la zone de captage.[10]

II.2.1- La qualité physique :

II.2.1.1-La température :

Le système de drainage est conçu en fonction de la source de prélèvement, certains effets sont à craindre notamment dans le cas des températures qui peuvent geler le réseau ou modifier les paramètres de sol (la perméabilité). [8]

II.2.1.2-La turbidité :

La couleur des eaux révèle en partie la charge ou volume des matériaux transportés. Cette charge comprend les substances dissoutes minérales (bicarbonate de calcium, chlorures, sulfates, ... etc.) et organiques dont les acides humiques qui, partout dans le monde, confèrent un reflet brun aux eaux qui ont drainé des régions marécageuses ou forestières.[8]

II.2.2-Les différents paramètres définissant la qualité chimique de l'eau d'irrigation :

Cinq principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation.

- 1- SALINITÉ : Contenu total en sel soluble.
- 2- SODIUM : Proportion relative des cations sodium (Na^+) par rapport aux autres.
- 3- ALCALINITÉ et DURETÉ : Concentration d'anions Carbonate (CO_3^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-) en relation avec la concentration en cations de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}).
- 4- concentration en éléments toxiques.
- 5- pH de l'eau d'irrigation.

Les deux premiers critères sont d'importance majeure car un excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions provoquent une sécheresse physiologique. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plantes flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celles qui sont perdues par évapotranspiration.[8]

II.2.2.1-SALINITÉ :

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante, une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires.[3]

II.2.2.1.1-Mesure de la salinité :

Elle peut se mesurer par deux façons, soit par les matières dissoutes totales (MDT) exprimées en mg/L ou, plus couramment, par la conductivité électrique.

La conductivité électrique est exprimée en milli siemens/centimètre (mS/cm). L'ancien nom de cette unité est le mho. Un mmho/cm est l'équivalent de 1 mS/cm qui est l'équivalent de 1000 microsiemens par mètre (dS/m) et en moyenne, à 640 ppm de sel.[9]

II.2.2.2- SODIUM (Na⁺) :

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément est originaire de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation.

Le principal problème est que la grande quantité de sodium, a un effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium absorbés au niveau des particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui entraîne un sol dur et compact lorsqu'il est sec.

La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que les sols plus lourds lorsqu'ils sont irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, cependant un problème potentiel existe.

Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme les carottes, les haricots, les fraises, les framboises, les oignons, pour en nommer quelques-unes.

De grande quantité de sodium combiné avec du chlorure donne à l'eau un goût salé. Si l'eau passe par un système d'aspersion et que le calcium et le magnésium sont bas, des teneurs moyennes à élevées de sodium peuvent défolier les plantes sensibles.[9].[2]

II.2.2.2.1- Mesure du sodium :

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le rapport d'absorption du sodium (SAR).

II.2.2.2.1.1-Le SAR :

Il décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés relativement en grande quantité dans l'eau d'irrigation.

Voici la façon dont on calcule le SAR (le sodium, le calcium, et le magnésium sont exprimés en mEq/L) : [8].[2]

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})/2}} \dots \dots \dots (2.1)$$

II.2.2.2.1.2-Les effets de SAR sur l'utilisation de l'eau :

De l'eau avec un SAR de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas. Un usage continu d'eau avec un SAR élevé provoque une déstructuration du sol.

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium.

Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problème liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol.

Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de SAR encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm avec un SAR au-dessus de 4 doivent être utilisées avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols.[2]

II.2.2.2.2-La notion de SAR ajusté:

En présence de bicarbonate, le SAR est insuffisant pour juger la qualité de l'eau et le risque d'alcalinité car l'effet de Na^+ est fortement dépendant de la présence d'ion CO_3^{2-} et HCO_3^- ; pour cela, il est plus correcte d'utiliser le **SARaj** pour caractériser le risque d'alcalinisation.

Le SARaj est défini par la formule suivante :

$$SAR_{aj} = SAR[1 + (8,4 - pHc)] \dots \dots \dots (2.2)$$

pHc : le pH théorique d'une eau d'irrigation en équilibre avec la calcite.

$$pHc = (PK_2' - PK_c') + P_{ca} + Palk \dots \dots \dots (2.3)$$

- **PK₂'**: C'est le log négatif de la 2^{ème} constante de dissociation de l'eau.
- **PK_c'**: Résultat de la solubilité de CaCO₃.
- **P_{ca}**: Log négatif de [Ca⁺⁺] de l'eau.
- **Palk**: Log négatif de [CO₃⁻] et [HCO₃⁻] de l'eau.[16]

II.2.2.2.2.1-Interprétation de pHc :

- 1- Si pHc > 8,4 → L'eau a tendance à dissoudre le CaCO₃ du sol.
- 2- Si pHc < 8,4 → L'eau a tendance à précipiter le CaCO₃ du sol.

II.2.2.3- Détermination de risque lié au carbonate (résidu sec en carbonate) :

Ce paramètre nous donne une idée sur le risque de la présence de sodium lié aux carbonates, ces derniers peuvent réduire le potentiel de Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺, principaux éléments faisant les liens entre les agrégats du sol.

Cette réduction donne une chance au Na⁺ pour se fixer sur le complexe argilo-humique.

$$Rsc = ([HCO_3^-] + [CO_3^-]) - ([Ca^{++}] + [Mg^{++}]) \dots \dots \dots (2.4)$$

- 1- Si Rsc < 1.25 mEq/l : Il n'y a pas de risque lié au carbonate.
- 2- Si 1.25 < Rsc < 2.5 mEq/l : De l'eau est marginale (utilisable).
- 3- Si Rsc > 2.5 mEq / l : De l'eau ne convient pas à l'irrigation. [2]

II.2.2.4- DURETÉ DE L'EAU :

La dureté fait référence à la quantité de calcium et de magnésium contenue dans l'eau. Ces deux éléments proviennent de l'altération de la roche-mère. La teneur en calcium est habituellement plus élevée que le magnésium dans les eaux souterraines. Par contre, là où on trouve de la contamination par l'eau de mer, la concentration en magnésium peut être plus élevée que celle du calcium.

En général, une eau dure n'est pas souhaitable pour l'usage domestique car elle réduit de beaucoup l'efficacité des savons. Par contre, en agriculture, une eau dure aide le sol à conserver une bonne structure par les ponts calciques.

Une eau riche en calcium et en magnésium possède généralement des quantités équivalentes de bicarbonate ou de carbonate, lesquelles la confèrent une alcalinité élevée. Lorsque l'alcalinité est élevée, le calcium et le magnésium sont les deux principaux éléments qui causent des problèmes d'eau incrustante et qui peuvent progressivement obstruer les goutteurs ou les pores du sol par des dépôts calcaires dans le cas d'une irrigation localisée.

Il arrive toutefois que la dureté de l'eau soit élevée sans pour autant que son alcalinité le soit. C'est le cas où le calcium et le magnésium de l'eau sont sous forme de sulfates et de chlorures.

La dureté est généralement exprimée sous forme d'équivalents de carbonate de calcium (CaCO_3) en ppm ou en mg/L.[8]

Tableau II.1: Degré relatif de dureté de l'eau selon la quantité de carbonate de calcium

Dureté (ppm CaCO_3)	Degré relatif de dureté
0-50	Très douce
50-100	Douce
100-200	Modérément douce
200-300	Dure
300 et plus	Très dure

Source : CRAAQ, 2003. Guide de production des annuelles en caissettes 313p.

II.2.2.5- ÉLÉMENTS TOXIQUES :

Certains éléments de l'eau d'irrigation peuvent être directement toxiques à la culture. Établir des limites de toxicité pour l'eau d'irrigation est compliqué de la part des réactions qui peuvent se passer quand l'eau atteint le sol. Les éléments potentiellement dangereux de l'eau peuvent être inactivés par des réactions chimiques ou bien s'accumuler dans le sol jusqu'à atteindre des niveaux de toxicité pour les plantes.[8]

II.2.2.5.1- Le bore, le sodium et le chlore :

Des excès en bore sont presque tout le temps associés à des puits très profonds qui ont également une forte salinité. Une eau d'irrigation contenant plus de 1 ppm de bore (B) peut causer une accumulation toxique pour les cultures sensibles, tel l'ail, l'oignon, les haricots et les fraises.

Les chlorures peuvent causer des dommages lorsqu'ils sont en trop grande quantité dans l'eau d'irrigation, à plus forte raison si l'irrigation se fait par aspersion.[1]

II.2.2.5.2-Sulfate : Le soufre est rarement toxique pour les plantes :

Les plantes sont très tolérantes aux sulfates. Leur concentration est généralement mesurée afin d'en prévenir les carences plutôt que d'en vérifier les excès potentiels. Des carences en soufre peuvent être appréhendées si l'eau d'irrigation contient moins de 48 ppm de sulfates.[8]

II.2.2.6- pH DE L'EAU D'IRRIGATION :

Le pH est la mesure de la concentration en ions hydrogène de la solution (H^+). Il est représenté par une expression logarithmique, c'est donc dire que la concentration en H^+ , à pH égal à 6,0 est 10 fois plus grande que celle à pH 7,0 et 100 fois plus grande que celle à pH 8,0. Plus la concentration en ion hydrogène est élevée, plus le pH est bas et plus c'est acide.

Le pH influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation. Le pH de l'eau d'irrigation devrait se situer entre 5,5 et 6,5. À ces valeurs, la solubilité de la plupart des micro-éléments est optimale.[8]

II.3- NORMES D'INTERPRÉTATION D'UNE ANALYSE D'EAU

Le tableau ici-bas résume les valeurs acceptables pour différents éléments trouvés dans l'eau d'irrigation. Ce sont des valeurs souhaitables lorsque l'eau est utilisée de façon continue. Les seuils pourraient être plus élevés lorsque l'eau d'irrigation est utilisée seulement en période de sécheresse.

Tableau II.2 : Norme d'interprétation d'une analyse d'eau pour la production de plantes annuelles.

Paramètres	Concentration maximale
Alcalinité (CaCO₃)	1 à 100 ppm (pas supérieure à 200)
Aluminium (Al³⁺)	0 à 5 ppm
Bicarbonate (HCO₃⁻)	30 à 50 (pas supérieure à 150)
Bore (B)	0,2 à 0,5 (pas supérieure à 0,8)
Calcium (Ca²⁺)	40 à 120 ppm
Chlore (Cl)	0-100 ppm (pas supérieure à 140)
Cuivre (Cu²⁺)	0,08 – 0,15 ppm (pas supérieure à 0,2)
Fluor (F⁻)	0 (pas supérieure à 1)
Fer (Fe³⁺)	1 à 2 ppm (pas supérieure à 5)
Magnésium (Mg²⁺)	6 à 25 ppm
Manganèse (Mn²⁺)	0,2 à 0,7 ppm (pas supérieure à 2)
Molybdène (Mo)	0,02 à 0,05 ppm (pas supérieure à 0,07)
pH	5 à 7
Potassium (K⁺)	0,5 à 5 ppm
Rapport d'absorption du sodium (SAR)	0 à 4
Sodium (Na⁺)	0 à 30 ppm (pas supérieure à 50)
Sulfate (SO₄²⁻)	24 à 240
Matière dissoute totale	70 à 700 ppm (pas supérieure à 875)
Zinc (Zn²⁺)	0,1 à 0,2 ppm (pas supérieure à 2,0)
Salinité (mS)	Inférieure à 1,0-1,5

Source : H.G. Peterson 1999. Water quality and Micro-irrigation for horticulture. Agriculture et Agroalimentaire Canada. [http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_e.htm]-CRAAQ, 2003. Guide de production des annuelles en caissettes 313p.]

Tableau II.3 : Barème de qualité pour l'eau d'irrigation

Type de problèmes	Sévérité du problème		
	Aucune	Légère	Élevée
Salinité - Conductivité (dS/m) - Matières dissoutes totales (mg/litre)	<0,75 <700	0,75-3,0 700-2000	>3 >2000
SAR (ratio d'absorption du Sodium)	<3	3-9	>9
Alcalinité ou dureté (équivalente à CO ₃)	80-120		>200
pH (risque de colmatage)	<7,0	7-8	>8,0
Fe(mg/l) (risque de colmatage)	<0,2	0,2-1,5	>1,5
Manganèse (mg/L) (risque de colmatage)	<0,1	0,1-1,5	>1,5

Source : Maynard D. N. et G .J. Hochmuth, 1997. Knott's Handbook for Vegetable growers. 582p.

II.3.1-Indexes d'appréciation du risque de salinisation par l'eau d'irrigation :

II.3.1.1- Risque salin : Conductivité électrique CE à 25 °C :

Tableau II.4 : Classes du risque salin.[16]

$CE \leq 250 \mu S \cdot cm^{-1}$	Risque faible
$250 < CE \leq 750$	Risque moyen
$750 < CE \leq 2250$	Risque élevé
$CE > 2250$	Risque très élevé

II.3.1.2- Risque alcalin :

Tableau II.5 : Classes du risque SAR.[16]

$SAR \leq 10$	Risque faible
$10 < SAR \leq 18$	Risque moyen
$18 < SAR \leq 26$	Risque élevé
$SAR > 26$	Risque très élevé

II.3.2-Diagramme de classification des eaux d'irrigation de RIVERSIDE. (USSL) :

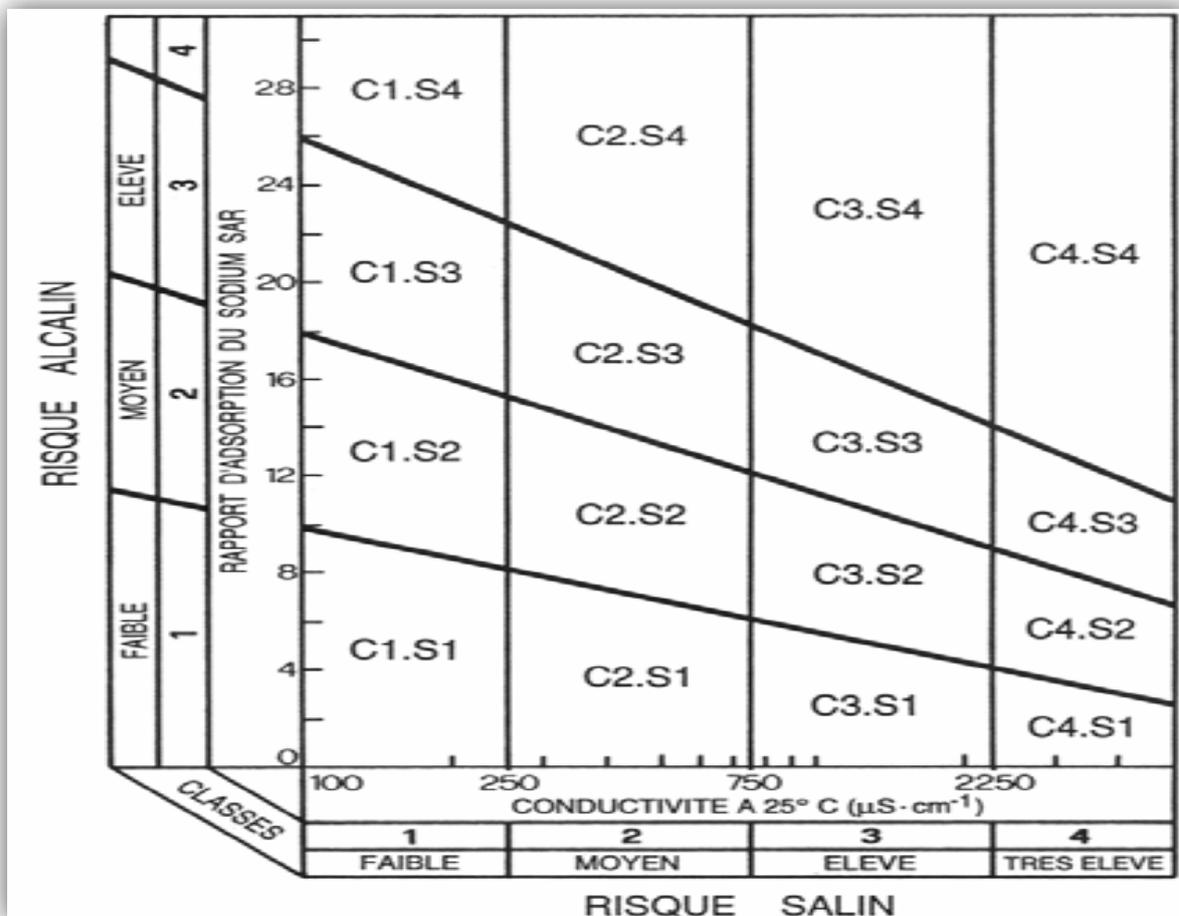


Figure N° II.1 :Diagramme de classification des eaux d'irrigation de RIVERSIDE.(USSL)

Source : Irrigation basique

Interprétation des classes correspondant aux couples risques salins - risques alcalins :

C1 S1 *Eau de bonne qualité* : Précautions avec les plantes sensibles.

C1 S2 *Qualité moyenne à bonne* : À utiliser avec précaution dans les sols lourds mal drainés et pour les plantes sensibles (arbres fruitiers).

C2 S2 *Qualité moyenne à médiocre*: À utiliser avec précaution. Nécessité de drainage
C1 S3 avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.
C3 S1

C1 S4 *Qualité médiocre à mauvaise*: Exclure les plantes sensibles et les sols lourds
C2 S3 Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés
C3 S2 avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.
C4 S1

C2 S4 *Qualité mauvaise*: À n'utiliser, avec beaucoup de précautions, que dans
C4 S2 les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistantes.
C3 S3 Risques élevés: Lessivage et apports de gypse indispensables.

C3 S4 *Qualité très mauvaise*: À n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles.
C4 S3

C4 S4 *Eau déconseillée* pour l'irrigation.

II.3.3- Évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation :

Nature des problèmes potentiels	Sans problème	Problèmes légers à modérés	Problèmes sérieux
<i>Disponibilité de l'eau pour la plante</i>			
CE (mS·cm ⁻¹)	< 750	750 - 3000	> 3000
Concentration totale (mg·l ⁻¹)	< 500	500 - 2000	> 2000
<i>Toxicité spécifique</i>			
<i>Absorption par les racines</i>			
Sodium (mg·l ⁻¹)	< 70	70 - 200	> 200
Chlorure (mg·l ⁻¹)	< 150	150 - 350	> 350
Bore (mg·l ⁻¹)	< 0.75	0.75 - 2	> 2
<i>Absorption par les feuilles (aspersion)</i>			
Sodium (mg·l ⁻¹)	< 70	> 70	
Chlorure (mg·l ⁻¹)	< 100	> 100	
<i>Nuisances diverses</i>			
Azote total (mg·l ⁻¹)	< 5	5 - 30	> 30
Bicarbonate (asp.) (mg·l ⁻¹)	< 90	90 - 500	> 500
pH	6.5 - 8.4	< 6.5 et > 8.4	
<i>Goutte à goutte</i>			
Pop. bactérienne (nbre par ml)	< 10'000	10'000 - 50'000	> 50'000
Manganèse (mg/l)	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
Fer (mg/l)	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
H ₂ S (mg/l)	< 0.5	0.5 - 2.0	> 2.0

Figure N°II.2 :Évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation.

Source : Irrigation basique

II.5- CONCLUSION

Si une eau de pauvre qualité est utilisée pour l'irrigation, une ou plusieurs de ces pratiques peuvent être nécessaires afin d'éviter les problèmes pouvant limiter les rendements de la culture:

- S'assurer d'un bon drainage souterrain : Si une couche indurée restreint le mouvement de l'eau à travers la zone racinaire, l'eau avec un SAR supérieur à 6 ou une salinité de 1,5 mmho/s ne devrait pas être utilisée.
- Ne pas permettre au sol de s'assécher : Une autre mesure, car étant donné la salinité, la plante ne peut prélever autant d'eau qu'en situation normale.
- Échantillonner régulièrement le sol afin de suivre l'évolution du sodium.
- Usage restreint : Utiliser seulement en période de sécheresse ou quand les autres sources d'eau manquent.

Parfois le coût et le risque est trop important pour qu'on puisse utiliser l'eau.

Pour cela, il faut faire attention à la qualité d'eau qu'on utilise.

Cependant, d'autres facteurs sont à prendre en considération tel que le type de sol, le climat ...etc.

Chapitre III :
ETUDE
HYDROLOGIQUE

III.1- Les pluies :[4]

La pluie est un facteur climatique très important à connaître pour faire un bon projet de drainage parce que la pluie est généralement la cause principale d'excès d'eau dans toute évaluation des quantités d'eau que la nature met à disposition des plantes. Mais cette quantité ne doit pas dépasser certaines limites.

Comme tout facteur climatique, la pluie est sujette dans le temps et dans l'espace à des variations en quantité et en qualité donc une étude statistique est toujours nécessaire pour ne pas exagérer ou pour ne pas sous-estimer sa contribution soit à l'irrigation soit au drainage dans les zones concernées.

III.2- Méthodes de calcul des probabilités de distribution des pluies :

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer la distribution fréquentielle des pluies, ou pour transformer les données des pluies en équations numériques qui ajustent ces phénomènes.

Nous allons choisir trois méthodes qui sont simples afin d'obtenir les données concernant les probabilités de chute des pluies. Le degré de probabilité doit prendre en considération la nature de la culture, son stade du développement car cela est en rapport direct avec les dommages pouvant être commis à la plante et à la rentabilité du produit agricole final.

Ces trois méthodes sont :

- **Ajustement à loi normale ou loi de Gauss.**
- **Ajustement à loi du log normal ou loi de Galton.**
- **Ajustement à loi de Gumbel.**

III.2.1-Critères de choix d'une loi :

Les critères de choix sont liés à un ajustement graphique d'abord et ensuite à un test de dispersion. L'allure des points sur du papier à probabilité permet de prime abord d'accepter ou de rejeter la loi (toute sinuosité, mauvaise courbure ou cassure de pente est considérée comme un mauvais ajustement).

Le test de dispersion permet d'accepter ou de rejeter l'appartenance d'une population à une loi donnée en fonction de seuil de tolérance fixé a priori (en générale 5%), un des tests les plus utilisés est le test du χ^2 (khi 2) ou test de PIZZETTI-PEARSON.

III.2.2-Le déroulement de l'ajustement :

Pour faire cet ajustement, on doit :

- Disposer les précipitations par un ordre de grandeur, et donner un numéro d'ordre pour chaque élément.

- Affecter un numéro d'ordre aux valeurs classées.
- Faire un choix de la formule du calcul pour la fréquence expérimentale. Dans notre cas on va prendre la formule de Hazen qui est définie comme suit :

$$F(x) = (m-0.5)*100/n \quad (\%) \dots\dots\dots(III.1)$$

Avec :

m : Numéro d'ordre.

n : Taille de l'échantillon.

- Calculer les caractéristiques empiriques de l'échantillon à savoir, (moyenne, écart type...etc.)
- Reporter les points sur papier à probabilité appropriée à chaque loi.
- Tracer la droite ou la courbe théorique appropriée.
- Lire ou calculer la valeur extrême (quantile).
- Tester l'adéquation de la loi d'ajustement.
- Calculer l'intervalle de confiance (quantile) pour les précipitations probables choisies.

III.3- Présentation des lois de probabilité de Gauss, de Galton et de Gumbel :

III.3.1-Loi normale ou loi de Gauss :

Une variable appartient à la distribution normale lorsque sa fonction de répartition est de la forme :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu} e^{-\frac{1}{2}\mu^2} du \dots\dots\dots(III.2)$$

(Fréquence au non dépassement)

u : Variable réduite de Gauss, elle est donnée par :

$$u = \frac{X-\bar{X}}{\sigma} \dots\dots\dots(III.3)$$

La formule de cette loi s'écrit comme suit :

$$X_{p\%} = \bar{X} + \delta * U_{p\%} \dots\dots\dots(III.4)$$

Avec:

$X_{p\%}$: Précipitation de probabilité P%.

\bar{X} : Moyenne arithmétique.

Avec :

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{X_i}{n} \dots\dots\dots(III.5)$$

δ : L'écart type, c'est la racine carré de la variance.

Avec la méthode des moments :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2} ; \text{ Si } n < 30 \dots\dots\dots(II.6)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2} ; \text{ Si } n \geq 30 \dots\dots\dots(II.7)$$

Où :

n : Taille de l'échantillon.

$U_{p\%}$: Variable réduite de Gauss.

Pour avoir les valeurs de $U_{p\%}$, on va utiliser une formule analytique d'approximation de l'intégrale de Gauss. Cette formule est :

Pour $F(x) \leq 0.5$

$$U_{p\%} = X - \frac{2.515517 + 0.802853 * X + 0.010328 * X^2}{1 + 1.432788 * X + 0.189269 * X^2 + 0.001308 * X^3} \dots\dots\dots(III.8)$$

Avec :

$$X = \sqrt{\ln \frac{1}{F(X)^2}} \dots\dots\dots(III.9)$$

Pour $F(x) > 0.5$: $F(x) = 1 - F(x)$ et $U = -U$.

Avec :

Ln: Symbole de l'opérateur mathématique correspondant au logarithme népérien.

Pour U > 0 on a

$$F(U) = 1 - \frac{0.5}{1 + 0.196854 * U + 0.115194 * U^2 + 0.000344 * U^3 + 0.019527 * U^4} \dots\dots(III.10)$$

Pour U < 0 : U = -U et F(x) = 1 - F(x).

III.3.2-Loi du log normal ou loi de Galton :

Une variable aléatoire X appartient à la distribution log normale lorsque Y=log X est normale, la loi de GALTON résulte de la loi normale mais rendue dissymétrique par un changement de variables, sa fonction de répartition est de la forme

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu} e^{-\frac{1}{2}\mu^2} du \dots\dots\dots(III.2)$$

(Fréquence au non dépassement)

u : Variable réduit de Galton, elle est donnée par :

$$u = \frac{\ln X - \overline{\ln X}}{\sigma_{\ln x}} \dots\dots\dots(III.11)$$

Cette méthode est comme suit :

Les données statistiques des pluies sont rapportées à une autre échelle à savoir l'échelle du log normal.

Nous avons l'équation de la droite de Galton qui s'écrit comme suit :

$$\mathbf{Ln}(X_{p\%}) = \overline{\mathbf{Ln}(X)} + \delta_{Ln} * U_{p\%} \dots\dots\dots(III.12)$$

Avec:

Ln: Symbole de l'opérateur mathématique correspondant au logarithme népérien.

X_{p%} : Précipitation probable à p%.

$\overline{\mathbf{Ln}(X)}$: Moyenne arithmétique des logs des précipitations observées.

δ_{Ln} : Variance, calculée pour les précipitations observées sous l'échelle logarithmique, sa formule s'écrit comme suit :

$$\delta_{Ln} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} [Ln(X_i) - \overline{Ln(X)}]^2} \quad \text{Si } n < 30 \dots \dots \dots (III.13)$$

$$\delta_{Ln} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} [Ln(X_i) - \overline{Ln(X)}]^2} \quad \text{Si } n \geq 30 \dots \dots \dots (III.14)$$

U_p% : variable réduite de Gauss.

III.3.3-Loi du log normal ou loi de Gumbel :

La fonction de répartition de la loi de Gumbel est :

$$F(x) = e^{-e^{-(x-x_0)/\alpha}} \dots \dots \dots (III.15)$$

- F(x) : Fréquence au dépassement de la valeur de x.
- α , X₀ : Coefficients d'ajustement .
- X₀ : Paramètre de position (mode).
- α : Paramètre d'échelle différent de zéro et positif appelé aussi « gradex ».

Par un changement de variable $y = \frac{x-x_0}{\alpha}$, la loi de Gumbel s'écrit :

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \dots \dots \dots (III.16)$$

y : Variable réduite de Gumbel.

En d'autre terme on peut écrire :

$$y = -\ln[-\ln(-F(x))]$$

Et l'équation de la droite qui représente la loi de Gumbel est écrite : $x = (1/\alpha).y + x_0$

III.3.3.1-Estimation des paramètres :

La méthode des moments conduit à des estimations de calcul particulièrement simple et d'emploi très fréquent avec :

$$\alpha = 0,78\sigma_x$$

$$X_0 = \bar{x} - 0,577. \alpha$$

III.3.3.2-Estimation de quantile :

Chaque estimation de quantile nécessite la connaissance de son intervalle de confiance, on peut la faire pour les trois ajustements à laide de cette équation.

$$X_{p\%} \pm \left(\frac{\frac{u_{\alpha}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{u_{p\%}}{2} + \frac{u_{p\%} + u_{\alpha}^2}{2n}}}{1 - \frac{u_{\alpha}}{2n}} \right) \sigma \dots\dots\dots(III.16)$$

III.3.3.3.Vérification de la linéarité de l'échantillon et l'adéquation de la fonction de probabilité :

Pour que cette analyse probabilitaire soit conforme aux règles, il faut qu'un nombre de conditions soient satisfaites, ces conditions sont relatives à un ajustement graphique et à un test de dispersion.

Dans notre cas, on va se satisfaire de deux vérifications qui sont :

- L'analyse du coefficient de corrélation linéaire.
- L'analyse du test d'adéquation de PEARSONIII.

III.4.Calcul du coefficient de corrélation :

Ce coefficient va nous renseigner sur la qualité de l'ajustement graphique de l'échantillon, et nous montrer ainsi, si la correction et l'homogénéisation des données s'avèrent nécessaire.

Pour calculer ce coefficient, on va utiliser la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2 * \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \bar{Y})^2}} \dots\dots\dots(III.17)$$

Avec :

r : Coefficient de corrélation.

\bar{X}, \bar{Y} : Moyenne arithmétique.

III.4.1-Interprétation du résultat :

- **r > 80%** : Bonne corrélation.
- **70% < r < 80%** : Corrélation est acceptable.
- **r < 70%** : Mauvaise corrélation.

III.5-Test d'adéquation de Pearson III :

Ce test va nous permettre de vérifier la qualité de l'ajustement ainsi réalisé par une méthode de calcul simple et efficace.

III.5.1) Procédé du calcul du test de Pearson III :

Pour faire ce test on procède comme suit :

➤ On divise l'échantillon en classes où chaque classe contient au minimum cinq éléments, et on fait le calcul de $\chi^2_{\text{calculé}}$ comme sur le tableau suivant, avec une probabilité de **P = 1-α**,

Avec : **α** est l'erreur acceptée. On la prend généralement égale à 5%

➤ On calcule $\chi^2_{\text{calculé}}$ avec la formule suivante :

$$\chi^2_{\text{calculé}} = \sum \frac{(n_i - \mu_i)^2}{\mu_i} \dots\dots\dots(III.18)$$

➤ On calcule le nombre de degré de liberté **γ** :

Avec :

$$\gamma = K-1-m \dots\dots\dots(III.19)$$

Où :

m : Nombre de paramètres de la loi.

➤ On détermine $\chi^2_{\text{théorique}}$ sur la table de Pearson III (voir le tableau III2 ci après).

Avec :

$$\chi^2_{\text{théorique}} = g(\gamma, \alpha) \dots\dots\dots(III.20).$$

-La loi est adéquate pour une erreur **α** si et seulement si : $\chi^2_{\text{calculé}} < \chi^2_{\text{théorique}}$.

- Une autre interprétation du χ^2 peut se faire :

- Si $\chi^2_{\text{calculé}} = 0$: C'est-à-dire si le nombre de valeurs observées est égal au nombre de valeurs théoriques suivant exactement la répartition des fréquences.
- Si $P(\chi^2_{\text{calculé}}) > 5\%$: L'ajustement est considéré.
- Si $p(\chi^2_{\text{calculé}}) < 1\%$: L'ajustement est à rejeter, la loi considérée n'est pas adéquate.
- Si $1\% < p(\chi^2_{\text{calculé}}) < 5\%$: On ne peut rien conclure, il faut refaire le calcul en modifiant le nombre de classe.

Tableau III.2 : Extrait de la table de χ^2 :

γ \ P	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.016	0.455	1.074	1.642	2.705	3.841	5.412	6.635	10.827
2	0.211	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	7.824	9.210	13.815
3	0.584	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	9.837	11.345	16.266
4	1.064	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	11.668	13.277	18.467
5	1.610	4.351	6.064	7.289	9.236	11.070	13.388	15.086	20.515
6	2.204	5.348	7.231	8.558	10.645	12.592	15.033	16.812	22.457
7	2.833	6.346	8.383	9.83	12.017	14.067	16.622	18.475	24.322
8	3.490	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	18.168	20.090	26.125
9	4.168	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	19.679	21.666	27.877
10	4.865	9.342	11.781	13.442	15.987	18.307	21.161	23.209	29.588

Source : Manuel pratique d'hydrologie.

Chapitre IV: LA
RECUPERATION
DES SOLS SALINS

IV.1- INTRODUCTION

Pourquoi étudier le sol?

Même si elle a trop souvent été négligée, l'étude des sols est un des éléments essentiels de la compréhension de l'environnement. Les sols constituent une mince couche recouvrant une grande partie de la terre ferme du globe. Ils retiennent les substances nutritives et l'eau utilisées par les végétaux et les animaux; ils filtrent et épurent l'eau; ils affectent la chimie de l'eau et la quantité d'eau qui retourne dans l'atmosphère. Les sols contiennent des millions de petits animaux et de micro-organismes jouant un rôle dans la décomposition des déchets et dans la manière dont les matériaux du sol se déplacent dans le profil pédologique, donnant naissance au principal système du recyclage naturel de la planète.

Les sols salés naturels couvrent de grandes surfaces sur tous les continents et sous tous les climats. Le développement mondial de la culture irriguée entraîne souvent une extension secondaire des terres salées liée à la dégradation chimique et physique des sols et à une mauvaise conduite de l'irrigation pour croître dans les milieux salés. Les espèces végétales résistent à la pression osmotique et aux contraintes chimiques (toxicité, carence...) en adaptant leur physiologie. Pour limiter les effets du sel sur les plantes et le sol, l'homme a recours à des pratiques culturales spécifiques.

Aussi, la salinité des sols cultivés doit pouvoir être évaluée avec suffisamment de précision pour éviter ses effets négatifs sur la production agricole. [22]

IV.1- Salinité:

IV.1.1-Définition de la salinité:

La salinisation du sol est le processus d'accumulation de sels à la surface du sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol ; il s'en suit une diminution des rendements et -à terme- une stérilisation du sol. [9]

IV.1.2- Origine de la salinisation des sols :

1. La salure peut être provoquée par le contact de la mer (salure d'origine marine).
2. Elle peut provenir des couches sédimentaires salifères (salure d'origine continentale ou géologique).
3. Elle peut se rattacher à certaines manifestations, généralement posthumes, du volcanisme (salure d'origine volcanique). [17]

IV.1.3-Type de salinisation : [3].

1- Salinisation primaire ou naturelle :

Elle est due aux sels se formant lors de l'altération des roches sous l'action des procédés de pédogenèse ou à des apports naturels externes.

2- Salinisation secondaire :

Induite par l'activité humaine ; liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées :

- Action de l'irrigation : Ce sont des sols précédemment non salés qui deviennent salins par l'effet de l'irrigation. Cette salinisation par l'irrigation est le fait :
 1. D'un mauvais choix des sols irrigables.
 2. Des eaux d'irrigations médiocres.
 3. Mauvaise gestion et efficacité du système d'irrigation.

IV.1.4- Effet du climat sur la salinité :

Les sols salins sont pratiquement inexistant dans les régions de climat humide où la percolation des eaux de pluie entraîne les sels solubles originaires présents dans le sol, ou formés à partir des minéraux du sol sous l'action des agents naturels. (Lessivage des sols).

Dans les régions arides ou semi-arides, le lessivage et le transport des sels solubles n'existent pas, de plus, l'évapotranspiration intense qui caractérise ces climats favorise la concentration des sels dans le sol. [3]

IV.1.5-Effet de la topographie et caractéristiques du sol sur la salinité :

Une condition essentielle de la salinisation des sols est l'existence de mauvaises conditions de drainage comme :

- Une topographie défavorable ne permettant pas de déboucher vers un cours d'eau (pente nulle zone de stagnation) et provoquant ainsi une remontée de la nappe phréatique.
- Une faible perméabilité du sol empêchant les mouvements de l'eau.
- Une texture ou une structure défavorable du sol.

L'absence du drainage ne permet pas l'évacuation des eaux excédentaires et l'eau est évaporée par la suite tandis que les sels s'accumulent et précipitent en surface. [3]

IV.1.6- Manifestation de la salinité :

La salinisation se manifeste par:

- Une baisse de rendement.
- La germination retardée/réduite.
- Des dégâts foliaires.
- Des croûtes de sel; en surface.
- Des brûlures sur les racines. [13]

IV.1.7- Mesure de la salinité du sol :

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la salinité, ces méthodes peuvent être du laboratoire ou in situ. [9]

IV.1.7.1-Mesure au laboratoire :

La détermination de la salinité d'un sol est fondée sur le principe de l'extraction d'un électrolyte dont on mesure la concentration en éléments dissouts par diverses méthodes (résidus sec, bilan ionique).

L'étude physico-chimique des solutions d'électrolytes fournit les éléments nécessaires au calcul de la conductivité électrique d'une solution à partir de sa composition chimique, en considérant notamment la conductivité molaire équivalente des ions (Robinson et Stokes, 1970). Cependant, cette approche nécessite une analyse chimique complète de la solution ainsi que de nombreux calculs. On préférera mesurer directement la capacité de l'électrolyte à conduire le courant électrique, propriété qui est d'autant mieux exprimée que la concentration ionique de l'électrolyte est plus élevée : la mesure de conductivité électrique (CEes) est aisée et s'effectue grâce à une cellule de mesure que l'on plonge directement dans l'électrolyte.

Un étalonnage préalable est nécessaire et la mesure est rapportée à une température standard, en général 25 °C

IV.1.7.2-Mesures sur site :

La méthode de la mesure de la salinité totale au laboratoire étant très longue et nécessitant beaucoup de travail et de temps, d'autres méthodes beaucoup plus souples faisant in situ ont été proposées. Parmi celles ci on peut citer :

- Le saltsensor .
- Les électrodes piquets .
- La salinité probe.
- **Le saltsensor** nécessite un temps de réaction trop long ne donne pas de très bons résultats, il est alors peu important de le décrire.
- **Le système à électrodes piquets** est identique à celui utilisé en prospections géophysiques sauf qu'en ce qui nous concerne, l'écartement entre les piquets n'est que de quelques dizaines de centimètres. C'est une méthode qui consiste à injecter du courant électrique alternatif ou continu, connaissant la d.d.p (différence de potentiel) entre les électrodes intérieures et l'ampérage du courant injecté. On calcule la résistance du sol qui est fonction de la concentration en sel de sa solution.
- **La salinité probe** utilise le même principe que le système à électrodes piquets, avec un écartement entre les piquets plus réduit (de quelques cm seulement). L'intérêt de ce procédé est qu'on peut enfoncer les électrodes, à des profondeurs déterminées, dans le sol pour y mesurer la salinité très localement.

IV.2- Alcalinité du sol [2]

Elle est définie comme étant :c'est le pourcentage du sodium échangeable qui est fixé au complexe absorbant (CAH) par rapport à la capacité d'échange cationique totale on l'appelle ESP

ESP : Exchange sodium pourcentage.

L'ESP est défini par :

$$ESP = \frac{Na^{+}adsorbé}{CEC} \left[\frac{mEq}{100g} \text{ de sol} \right] \dots\dots\dots (IV.1)$$

CEC : Capacité d'échange cationique du complexe (AH)

CEC= Ca⁺⁺+Mg⁺⁺+Cl⁻+.....etc. [mEq/100g de sol].

On peut aussi estimer l'alcalinité du sol avec le SAR. Il existe des formules de conversion entre le SAR et l'ESP

- **Conversion utilisée aux USA**

$$ESP = 100 \left(1 - \frac{1}{0.9874 + 0.01475 * SAR} \right) \dots\dots\dots (IV.2)$$

- **Conversion utilisée en TUNISIE [19]**

$$ESP = 0.988 * SAR - 0.61 \dots\dots\dots (IV.3)$$

IV.3- CLASSIFICATIONS DES SOLS SALINS :

La classification des sols salés a pour but de connaître le type de classe avant d'entreprendre des mesures préventives ou curatives efficaces.

Il existe trois types de classification dont les plus utilisées à l'échelle mondiale :

- La classification française,
- La classification russe,
- La classification de la FAO,

IV.3.1 La classification française :

Il existe 3 grands types de sols salés définis selon leur salinité (Conductivité électrique) et leur alcalinité (ESP). C'est ainsi qu'on distingue : [2]

IV.3.1.1- Les sols salins non alcalins (CE>4 mmho/cm et ESP <15%) :

Ce sont des sols salés qui contiennent de sels solubles en quantité qui peuvent fariner ou arrêter le développement de la plupart des plantes car ils dépassent leur limite de tolérance, mais la quantité de Na⁺ reste dans la limite avec un faible risque.

IV.3.1.2- Les sols alcalins non salins (CE <4 mmho/cm et ESP >15%) :

Ce sont des sols qui ont de mauvaises propriétés physiques. Leur récupération est délicate et nécessite une combinaison d'amendement, de lessivage et un choix judicieux des cultures à mettre en place. Le pH dans ce type de sols est en général supérieur à 8,5 voire 10 parfois.

IV.3.1.3- Les sols alcalins et salin (CE>4 mmho/cm et ESP >15%) :

Ce sont des sols qui contiennent en quantité importante des sels solubles et avec une dominance de l'ion sodium donc le taux de Na⁺ est >10% de la capacité d'échange. Ils sont assez difficile à récupérer car bien que comportant une forte proportion de sels solubles, un simple lessivage pourrait les transformer en sol alcalins, dégradant ainsi leurs propriétés physiques.

Tableau IV.1: Récapitulatif

	CE à 25°C (mS · cm⁻¹)	ESP
Sols salins¹	> 4	< 15
Sols alcalins (sodiques)²	< 4	> 15
Sols alcalino-salins³	> 4	> 15

IV.3.2- La classification russe : [16]

C'est la classification la plus connue. Cette classification comporte 3 grandes catégories :

- Les solontchaks .
- Les solonetz .
- Les solods.

IV.3.2.1- Les Solontchaks :

(Qui correspond au sol salin alcalin). Ce sont des sols salins qui contiennent de grandes quantités de sels solubles toxiques sur les 30 premiers centimètres de l'horizon superficiel et qui décroît en profondeur. Sur ce type de sols, aucune récolte n'est en principe possible. Il n'y pousse que quelques halophytes adaptées aux conditions salines.

IV.3.2.2- Les solonetz :

Ce sont des sols alcalins (lourds) le taux de Na^+ est supérieur à 10%. Il y'a aussi des sols magnésiques dans les solonetz dont le taux Mg^+ est supérieur à 15%.

C'est un nom donné à un groupe de sols alcalins caractéristiques des steppes et des régions arides et désertiques. Ils sont caractérisés par un ESP très élevé car ne contenant pas beaucoup de sels solubles autres que NaCl. Ce sont donc des sols qui présentent de mauvaises caractéristiques physiques car on connaît l'effet des ions Na^+ sur les propriétés des sols.

IV.3.2.3 Les solods :

Ce sont des sols très lessivés presque impropres pour l'agriculture. Nous avons 2 ions ; SO_4^{2-} ion très mobile ; Cl^- ion qui peut être absorbé (moins mobile que SO_4^{2-}).

IV.3.3 La classification de la FAO :[2]

C'est une classification des sols salés qui tient compte de la tolérance des cultures. En irrigation, cette classification est très importante, car permettant de choisir les cultures à mettre en place sur tel type de sol en fonction de sa salinité. Cependant, elle présente l'inconvénient de prendre en considération la concentration totale en sels du sol, sans se préoccuper de la nature des ions en solution (effets de toxicité). Les différentes classes sont répertoriées dans le tableau suivant:

Tableau IV.2: classification des sols salés et leurs effets sur les cultures

Classe des sols salés	Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (dS/m)	Effets sur les cultures
Non salés	0 - 2	Effets de la salinité négligeables
Faiblement salés	2 - 4	Les cultures sensibles sont à éviter
Sols salés	4 - 8	Les cultures semi- tolérantes peuvent être pratiquées
Sols très salés	8 - 16	Seules les plantes tolérantes peuvent être cultivées
Sols extrêmement salés	16	Quelques rares cultures extrêmement tolérantes peuvent pousser

IV.4- Le lessivage

La mise en valeur des sols peut être salés et/ou sodiques se heurte à trois types de problèmes. On peut noter une difficulté d'absorption de l'eau qui est liée à la pression osmotique des solutions riches en sels dissous ; il peut y avoir aussi dégradation des propriétés physiques du sol due à la fixation du sodium sur le complexe ; enfin des problèmes de toxicité des sels sont susceptibles d'apparaître.

Les cultures pâtiennent d'un excès de sels ou de sodium échangeable. Cependant les conséquences sur l'état végétatif dépendent de la qualité des eaux d'irrigation, de la tolérance des végétaux et de la conduite des irrigations.

Dans le cas de sols salés, les propriétés physiques sont relativement satisfaisantes et un apport d'eau supérieur au besoin des cultures permet l'entraînement des sels en profondeur ; on s'affranchit ainsi des contraintes liées à une salinité excessive. Mais pour se faire il faut savoir calculer des doses de lessivage qui sont compatibles avec les exigences culturales et le maintien de **la fertilité des sols**. [3]

IV.4.1-La dose de lessivage (LR)[3]

En zone aride et semi-aride, l'irrigation des sols salés nécessite un apport d'eau supérieur au besoin des cultures. Ce volume excédentaire lessive les sels et les repousse en profondeur. La méthode de prévision du volume de lessivage.

Habituellement utilisée (méthode classique, recommandée par la FAO) néglige la précipitation de minéraux à partir de la solution du sol. Il y a une autre méthode, dite géochimique, prenant en compte ces phénomènes par le biais d'un modèle thermodynamique,

Nous nous intéressons ici à la méthode classique.

IV.4.1.1-Le bilan salin.

Le bilan salin global dans le sol en périmètre irrigué s'exprime comme suit :

$$I_w.C_i - D_w.C_d + S_a + S_s + S_p + S_c = \Delta S \dots \dots \dots (IV.4)$$

- I_w, D_w : La lame d'eau (d'irrigation / drainage).
- C_i, C_d : Concentration dans l'eau (d'irrigation / drainage).
- S_s : Quantité de sel mis en solution par l'eau traversant le sol.
- S_a : Quantité de sel apporté par les engrais ou les amendements.
- S_p : Quantité de sel précipité.
- S_c : Quantité de sel consommé par la culture.
- ΔS : Variation de stocke salin dans la zone racinaire.

Pour simplifier le bilan salin, on utilise les deux hypothèses suivantes

1^{ère} Hypothèse

On va considérer que :

$$\sum Si = Sa + Ss + Sp + Sc \approx 0 \text{ est négligeable .}$$

2^{ème} Hypothèse

La variation de taux de sel $\Delta S = 0$.

A partir de ces hypothèses, on pose:

$$I_w.C_i - D_w.C_d = 0 \implies LR = \frac{D_w}{I_w} = \frac{C_i}{C_d} = \frac{CE_{wi}}{CE_{wd}} \dots \dots \dots (IV.5)$$

- LR : Est la quantité minimale d'eau d'irrigation qui percole en profondeur par rapport Au totale apporté pour maintenir l'équilibre salin à un niveau donné.
- CE_{wi} : Conductivité électrique d'eau d'irrigation.
- CE_{wd} : Conductivité électrique d'eau de drainage, elle dépend directement du maximum de salinité que l'on peut accepter par la culture pratiquée et en fonction de leur chute de rendement.

Plusieurs formules existent pour la détermination de la fraction de lessivage.

IV.4.1.2.Méthode traditionnelle :

Cette formule est utilisable pour une chute de rendement égale à 50%.

$$LR = \frac{CE_{wi}}{CE_{es}} \dots \dots \dots (IV.6)$$

- CE_{wi} : Conductivité électrique d'eau d'irrigation.
- CE_{es} : Conductivité électrique d'eau de l'extrait de la pate saturée, il d dépend directement du maximum de salinité acceptée par la culture pratiquée et en fonction de leur chute de rendement inférieur ou égal à 50% par rapport aux conditions standards.

On constate que si l'on utilise cette conception on trouve des chiffres de (LR) très élevés .De se fait, la distribution d'eau devient non économe ; de plus, si on applique la notion de l'efficacité de lessivage (Lf) qui varie entre (0,3 a 0,8) [en fonction de structure et texture de sol] les besoins peuvent dépasser l'ETR (évapotranspiration réelle).

Les conséquences sont les suivantes :

- Gaspillage de l'eau, (l'eau est un facteur de production rare).
- Sur dimensionnement du réseau d'irrigation et de drainage.
- L'élévation de la nappe.
- Perte de la fertilité de sol.
- Surdimensionnement des ouvrages hydrauliques (canaux, station de pompage ,..etc.)

D'une manière générale, l'opération culturale devient non rentable, pour cette raison une nouvelle formule est plus utilisée (**Nouvelle conception**).

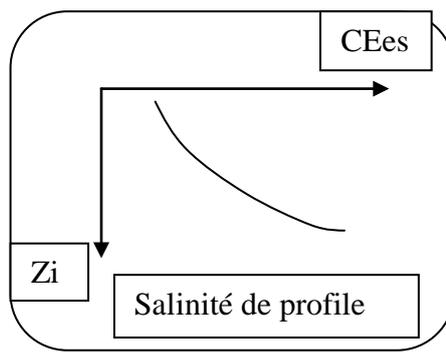
IV.4.1.3-Nouvelle conception [19]

L'expérimentation a montré que la salinité du sol a une tendance à l'accroissement vers le bas, cette accroissement est dû au fait que l'eau

d'irrigation qui traverse le sol entraine une partie des sels et l'autre partie est consommée par les plantes

Plus on descend, plus elle se concentre,

alors on peut faire une estimation de la sorte :



$$\overline{CEes} = \frac{\sum CEes_i * Ri * Zi}{\sum Zi} \dots\dots\dots(IV.7)$$

- CEes_i : Conductivité électrique d'eau de l'extraie de la pate saturée de l'horizon (i).
- Ri : Taux d'extraction d'eau par les racines de cet horizon.
- Zi : Épaisseur de cet horizon.

On admet que la répartition de l'extrait hydrique est proportionnelle à la densité racinaire comme suit.

- 40% pour le quart supérieur (premier).
- 30% pour le deuxième quart.
- 20% pour le troisième quart.
- 10% pour le quatrième quart.

Et on aura :

$$CEes = 0,4*CEes1 + 0,3*CEes2 + 0,2*CEes3 + 0.1*CEes4 \dots\dots\dots(IV.8)$$

IV.4.1.4-Formule de BERNSTEIN :

Cette formule est utilisable pour une chute de rendement égale à 100%. [14]

$$LR = \frac{CE_{wi}}{CE_{dw}} \dots \dots \dots (IV.9)$$

Avec : CE_{es} = CE_{dw}.

IV.4.1.5- Formule de RHOADS :

Cette formule est utilisable pour une chute de rendement égale à 10%

$$LR = \frac{CE_{wi}}{5 * CE_{es} - CE_{wi}} \dots \dots \dots (IV.10)$$

CE_{es} : Conductivité électrique d’eau de l’extrait de pate saturé dépend directement du maximum de salinité que l’on peut accepter par la culture pratiquée et en fonction de leur chute de rendement inférieure au égale à 10%. [14]

IV.4.2- La notion de l’efficacité de lessivage.

LR calculé représente les besoins de lessivage minimal nécessaire pour lutter contre la salinité ; avec la méthode ordinaire d’irrigation de surface on suppose que LR a atteint une efficacité (Lf) de 100% c'est-à-dire l’eau percole lentement à travers le sol.

Mais en pratique, l’hétérogénéité du sol fait que l’eau en partie coule très rapidement à travers les chemins préférentiels (racine , fissure) sans avoir l’action de lessivage , on est donc amené à considérer l’efficacité de lessivage.

$$\text{besoin de lessivage} = \frac{LR \text{ calculé}}{Lf} \dots \dots \dots (IV.11)$$

Tableau IV.3 : Lf en fonction du type du sol.

type du sol	Lf
Fissuré	30%
Sableux	90% -----100%
Moyenne	50% -----60%

IV.5- Détermination du volume d'eau à apporter : [2]

Le volume nécessaire à l'irrigation est donné comme suit :

$$Iw = Dw + ETM \dots \dots \dots (IV.12)$$

Et la dose du lessivage est:

$$LR = \frac{Dw}{Iw} \implies Dw = LR \cdot Iw \dots \dots \dots (IV.13)$$

Alors : $Iw = LR \cdot Iw + ETM \implies Iw = \frac{ETM}{1-LR}$

Si on considère l'efficacité du lessivage $Lf \implies Iw = \frac{ETM}{1-\left(\frac{LR}{Lf}\right)} \dots \dots \dots (IV.14)$

IV.6- INTENSITÉ DU LESSIVAGE :

Dans l'absolue, on peut apporter des doses de lessivage énormes avec des eaux très salées (4 mmho/cm), pour arriver à des salinités du sol donnant des rendements acceptables. Cependant, en pratique, il est difficile concrètement de descendre au-dessous d'un seuil de salinité donnée (empirique).

- CEiw = 4-5mmho/cm → CEes = 1,5CEiw .
- CEiw = 6-8mmho/cm → CEes = 1,3CEiw .
- CEiw = 12.5mmho/cm → CEes = 1CEiw .

On peut relativement retenir ce seuil comme limite à l'objectif de salinité de sol.

On peut noter aussi que les pertes par mauvaise efficacité des systèmes d'irrigation contribuent au lessivage. [2]

IV.7- LESSIVAGE CAPITALE. [16]

Il consiste à apporter en une seule fois une grande quantité d'eau sur une parcelle. Le but est de faire chuter la salinité du sol à un niveau acceptable.

La formule appliquée est celle de F.VOLOBUEV.

$$H = - \alpha \cdot \theta \cdot \Delta \cdot \log_{10} \left(\frac{S-Si}{S_0-Si} \right) \dots \dots \dots (IV.15)$$

- H : Hauteur d'eau à amener[m].
- α : Coefficient dépendant de la nature du sol.
- Δ : Épaisseur du sol à lessiver [m].
- S : Salinité moyenne à atteindre [mmho/cm].
- Si : Salinité d'eau d'irrigation [mmho/cm].
- S0 : Salinité moyenne avant le lessivage [mmho/cm].
- θ : Humidité volumique.

Tableau IV.4-: LES VALEURS DE α . [16]

Nature du sol	α
Sable limoneux	0.5-----0.6
Limon sableux	
Argile sableux	0.4-----0.5
Argile limoneux	
Argile	0.2-----0.3

IV.8- Conclusion

Dans le cadre d'exploiter les sols salins, il faut prendre en considération tous les facteurs influençant sur la salinité du sol.

Pour cela, on doit choisir le mode convenable à l'amélioration de ces sols par utilisation parfaite des ressources en eau en prenant en considération l'influence de ce dernier sur l'environnement.

Chapitre V:
L'EXCES D'EAU

V.1-Les sols et le cycle de l'eau :

V.1.1- Introduction :

Dans le cycle de l'eau, la couverture pédologique joue un rôle clef tant pour les aspects quantitatifs que qualitatifs. Elle est un réservoir d'eau pour l'alimentation en eau des plantes et pour l'ensemble des êtres vivants qui y sont présents. Dans ces vides – ou pores – de taille et de forme très diversifiées, la présence d'eau en quantité variable mais permanente permet à de nombreux microorganismes de se développer et de vivre ou être perturbés quand les conditions sont plus défavorables.

La phase liquide est une solution dont la composition chimique dépend des constituants minéraux et organiques et des êtres vivants au contact desquels elle se trouve ainsi que de la durée de ce contact. Cette solution du sol comportant des éléments dissous, complexes ou colloïdaux, est liée aux caractéristiques des constituants du sol et à celles de ses propriétés du transfert.

Les caractéristiques importantes des solums sont alors : les phases solides présentes, leur mode d'assemblage et la géométrie du réseau de pores qui en résulte et qui contrôle les écoulements.

Ainsi, sous un climat et une végétation donnés, les quantités d'eau qui alimentent les eaux superficielles et souterraines, ainsi que leur composition chimique, sont largement déterminées par les caractéristiques des sols sur lesquels elles ruissellent ou dans lesquels elles s'infiltrent. [5]. [11]

V.1.2- Différents états de l'eau dans le sol :

Il existe plusieurs états de l'eau dans le sol suivant son origine et sa situation; l'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides (figure 1). On distingue :

- *L'eau de constitution*, qui entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules du sol sont formées.
- *L'eau liée ou absorbée*, à la surface des grains très fins, qui est orientée par les forces d'attraction moléculaire et les forces électrostatiques ; elle a une viscosité élevée et ne transmet pas les pressions.
- *L'eau libre*, qui circule librement dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur.
- *L'eau capillaire*, qui, dans les sols non saturés, en présence d'air ou d'autres gaz, est retenue dans les canaux les plus fins du sol par les forces capillaires.

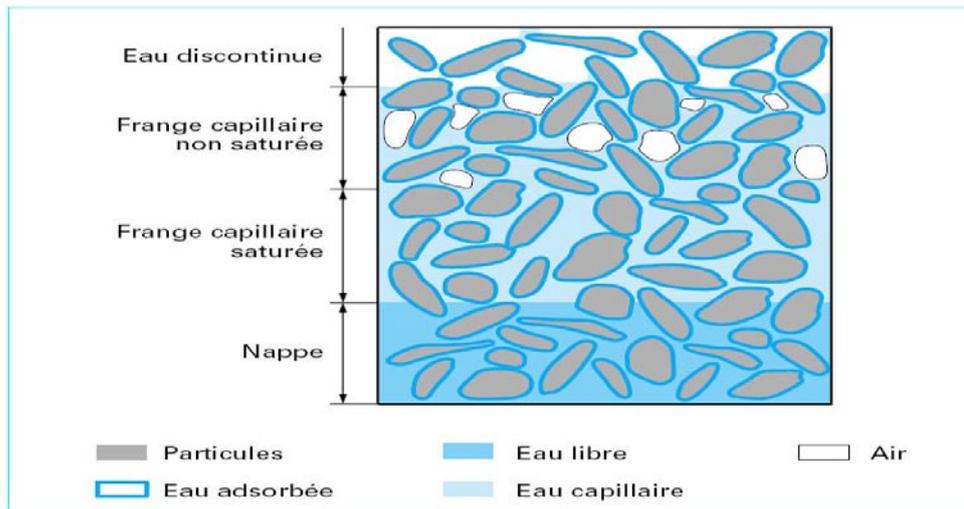


Figure V.1 : État de l'eau dans le sol.

Source : Technique d'ingénieur.

Ces liaisons de l'eau avec les particules du sol dépendent de la nature minéralogique des particules et de leurs dimensions. Dans les sols fins argileux, l'eau peut se trouver dans les quatre états indiqués ci-avant et la hauteur de la frange capillaire peut atteindre plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la surface de la nappe. Dans les sables, il n'y a pas d'eau de constitution et en général pas d'eau liée et la frange capillaire à quelques centimètres de hauteur. Au-delà de la hauteur limite d'ascension capillaire (frange capillaire), l'eau n'est plus continue dans l'espace des pores et n'intervient pas de façon autonome dans le comportement mécanique du sol.[21]

V.1.3- Bases théoriques :

Les variations d'état énergétique de l'eau dans la couverture pédologique sont le moteur des transferts d'eau, mais l'importance de ces transferts est aussi dépendante de sa capacité à se laisser traverser par l'eau.

Ces variations sont déterminées par les conditions externes à la couverture pédologique qui sont soit directement appliquées à la limite supérieure (apport d'eau lors d'une pluie ou départ par évaporation à la surface du sol) et à la limite inférieure (par exemple, nappe présente à sa base), soit indirectement par l'intermédiaire de prélèvements d'eau par les racines (transpiration par les organes aériens).

La couverture pédologique n'étant pas, en règle générale, saturée en eau (à la différence des matériaux géologiques aquifères), les transferts d'eau y font varier les stocks d'eau à la fois dans l'espace et dans le temps.

La description des transferts d'eau dans la couverture pédologique s'appuie donc sur la connaissance des trois grandeurs : sa teneur en eau, l'état énergétique de l'eau et sa capacité à conduire l'eau. Les relations entre ces trois grandeurs varient selon les types du sol et sont appelées caractéristiques hydriques du sol. [21]. [12]

V.1.3.1- Stock d'eau et teneur en eau :

Le stock d'eau S_w dans un sol se calcule à partir de sa teneur en eau. Celle-ci s'exprime de différentes façons selon les grandeurs utilisées pour caractériser les quantités d'eau et du sol dans laquelle elle est contenue.

Teneur en eau massique ou pondérale :

La teneur en eau massique (appelée aussi pondérale) W (pour *water* = eau) correspond au rapport entre la masse d'eau M_w contenue dans le sol et la masse du sol sec M_s

(s pour solide) : $\theta_w = M_w / M_s$.

Le sol sec est défini de façon standard comme l'état du sol séché à une température de 105°C.

Teneur en eau volumique :

La teneur en eau volumique θ correspond au rapport entre le volume d'eau V_w contenu dans le sol et le volume total des trois phases (liquide, solide, gazeuse) du sol ou volume apparent $V_b = V_a$ (b pour *bulk* = global = apparent) puisqu'il ne s'agit pas du seul volume de la phase solide : $\theta_v = V_w / V_a$.

Le passage d'une teneur en eau massique à une teneur en eau volumique s'obtient par :

$$\theta_v = (\rho_b / \rho_w) \cdot W$$

Où ρ_w est la masse volumique de l'eau (approximativement 1000 kg m⁻³) et ρ_b , la masse volumique apparente du sol définie par : $\rho_b = M_s / V_b$.

On utilise aussi fréquemment la densité apparente D_a du sol pour passer de θ_w à θ_v . D_a est définie par : $D_a = M_s / (V_a \rho_w)$.

Dans ce cas, $\theta_v = \theta_w \cdot D_a$.

V.1.3.2- Porosité n :

La valeur de n peut se calculer à partir de ρ_b lorsqu'on connaît la masse volumique de la phase solide du sol ρ_s : $n = 1 - \rho_b / \rho_s$.

La masse volumique de la phase solide des sols peut être estimée voisine de celle du quartz : 2,65 Mg.m⁻³, dans le cas de sols peu organiques et à faible teneur en oxydes et hydroxydes de fer. La gamme de variation des valeurs de ρ_b couramment rencontrée dans la nature est de 1,1 à 1,7 Mg.m⁻³, soit une porosité variant entre 0,60 et 0,35, respectivement

Dans la réalité, la teneur en eau maximale d'un sol, appelée aussi teneur en eau à saturation θ_s , n'atteint pas la valeur de la porosité mais reste légèrement inférieure en raison de la difficulté à déplacer l'ensemble de la phase gazeuse du sol par de l'eau et de l'existence de pores difficilement accessibles. On estime généralement que θ_s représente 93 à 95 % de la porosité n .

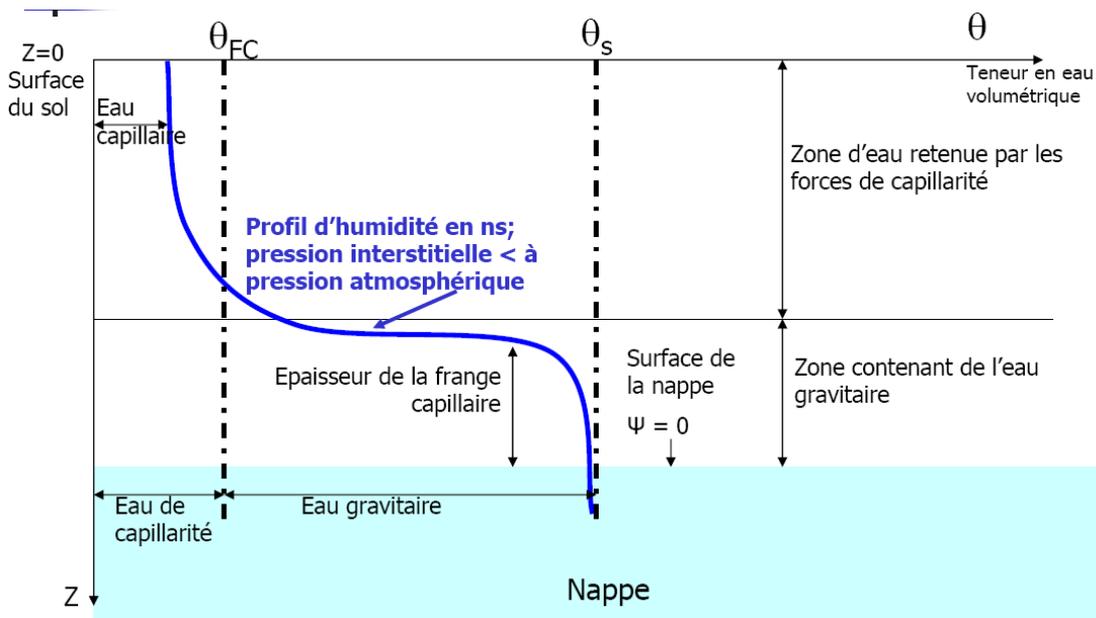


Figure V.2: Variation du stockage d'eau dans le sol.

Source : Physique du sol.

V.1.3.3- Stock d'eau :

Lorsque la teneur en eau d'un sol est exprimée à l'aide de θ_w , le stock d'eau S_w en

mm de lame d'eau s'obtient par : $S_w = E \theta_w (\rho_b / \rho_w)$

où E est l'épaisseur du solum en mm. Lorsque la teneur en eau est exprimée à l'aide de θ_v , S_w s'obtient alors par : $S_w = E \cdot \theta_v$.[12]

V.1.3.4- Potentiel de l'eau :

La grandeur, qui permet de décrire et prévoir les transferts d'eau dans la couverture pédologique, est le « potentiel de l'eau », quantité d'énergie contenue dans une quantité unitaire d'eau. L'état énergétique de l'eau dans le sol se décompose en énergie potentielle de position dans un champ de force et en énergie cinétique due à la vitesse de déplacement du liquide. Cette dernière, généralement faible dans les sols, est négligeable devant le terme d'énergie potentielle. On considère donc que le terme « énergie potentielle », ou « potentiel », suffit à décrire l'état énergétique de l'eau dans le sol. Dans tout ce qui suit, on considérera l'eau comme un liquide incompressible et se déplaçant uniquement sous forme liquide en conditions isothermes. Le phénomène d'évaporation ne sera donc pas traité ici.

V.1.3.4.1-Le potentiel total de l'eau Ψ_t :

Il correspond au travail nécessaire pour déplacer de façon totalement réversible une unité de quantité d'eau de l'état énergétique de référence à celui de l'eau dans le volume du sol considéré. À l'équilibre, le potentiel total de l'eau est identique en tout point de l'espace. Toute variation dans l'espace du potentiel de l'eau entraînera un déplacement spontané de l'eau.[12]

V.1.3.4.2- Unités :

Il est possible d'exprimer le potentiel de l'eau dans différentes unités en fonction de l'unité prise pour caractériser la quantité d'eau. Le Joule (J) est l'unité d'énergie dans le Système International (SI). Trois grandeurs sont couramment utilisées pour exprimer la quantité d'eau : la masse, le volume et le poids. Il en résulte 3 unités possibles pour le potentiel de l'eau (tableau 15.1).

TABLEAU 15.1: LES UNITES DU POTENTIEL DE L'EAU :

Unité de quantité d'eau	Symbole	Nom usuel	Dimension	Unité SI
Masse	μ	Potentiel chimique	L^2T^{-2}	J Kg ⁻¹
Volume	Ψ	Potentiel	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa (N m ⁻²)
Poids	H	Charge hydraulique	L	M

Source : Les sols et le cycle de l'eau.

V.1.3.4.3- Composantes du potentiel de l'eau dans un sol :

Dans le sol, l'eau est soumise au champ de force lié à la gravité et à des interactions dues aux phases solide et gazeuse ainsi qu'à la présence de solutés dans la phase liquide. À l'échelle macroscopique, ces forces s'expriment à travers divers phénomènes comme la capillarité, l'osmose... La distinction entre ces phénomènes est à la base de la décomposition du potentiel total de l'eau en ses composantes.

Si on peut négliger les variations de température, on distingue 3 composantes de base du potentiel total : gravitaire et de pression, cette dernière étant décomposable en composantes matricielles et hydrostatique et potentiel osmotique. [12]

V.1.3.4.3.1- Gravité et potentiel gravitaire :

Le potentiel gravitaire, h_g , de l'eau est le travail nécessaire pour déplacer de manière réversible une unité de quantité d'eau de l'état de référence jusqu'à l'altitude du point considéré dans le sol. Le potentiel gravitaire correspond donc à un déplacement dans le champ de pesanteur.

En général, l'axe des altitudes est orienté vers le haut, puisque l'eau s'écoule par gravité dans le sens des potentiels décroissants. Par conséquent, l'altitude de référence étant la surface du sol, le potentiel gravitaire sera négatif dans le sol, positif au dessus de la surface du sol. Le potentiel gravitaire, en unité de pression, s'exprime par : $h_g = z$, où z est l'altitude du volume du sol considéré.[12]

V.1.3.4.3.2- Potentiel de pression ou potentiel tensiométrique [capillaire] :

Le potentiel de pression, h_p , de l'eau est le travail nécessaire pour déplacer de manière réversible une unité de quantité d'eau de l'état de référence jusqu'à la pression de l'eau dans le volume du sol considéré. Le potentiel de pression h_p est directement mesurable à l'aide d'un tensiomètre.

L'état de pression de l'eau dans le sol peut être très différent selon que l'on ait fait à un sol saturé en eau, ou non saturé. Ce constat amène à la distinction de deux types de potentiel de pression, potentiel de pression hydrostatique ou potentiel de pression capillaire, l'un prenant le relais de l'autre selon l'état de saturation du sol.

Potentiel de pression hydrostatique :

Lorsque le sol est saturé, l'eau est soumise à la pression exercée par la colonne d'eau qui la surmonte au point considéré. Le potentiel de pression h_p est alors positif pression supérieure à la pression atmosphérique de référence) et correspond à la hauteur de la colonne d'eau (m).

Potentiel de pression capillaire ou potentiel matriciel:

Lorsque le sol n'est pas saturé, il existe des forces de tension superficielle aux interfaces entre les phases gazeuse, liquide et solide. Ces forces de tension superficielle déterminent la courbure des interfaces entre la solution et l'air du solet, par conséquent, leur différence de pression.

Le potentiel de pression capillaire de l'eau ou potentiel matriciel (potentiel lié aux caractéristiques du sol considéré comme une matrice poreuse) dans un pore cylindrique parfaitement rectiligne[12].[5]

V.1.3.4.3.3- Potentiel osmotique

Le potentiel osmotique de l'eau est le travail nécessaire pour déplacer de manière réversible une unité de quantité d'eau de l'état de référence jusqu'à l'altitude du point considéré dans le sol, ce sont des potentiels chimiques qui peuvent se développer de part et d'autre de membrane semi-perméable telle que les parois des cellules

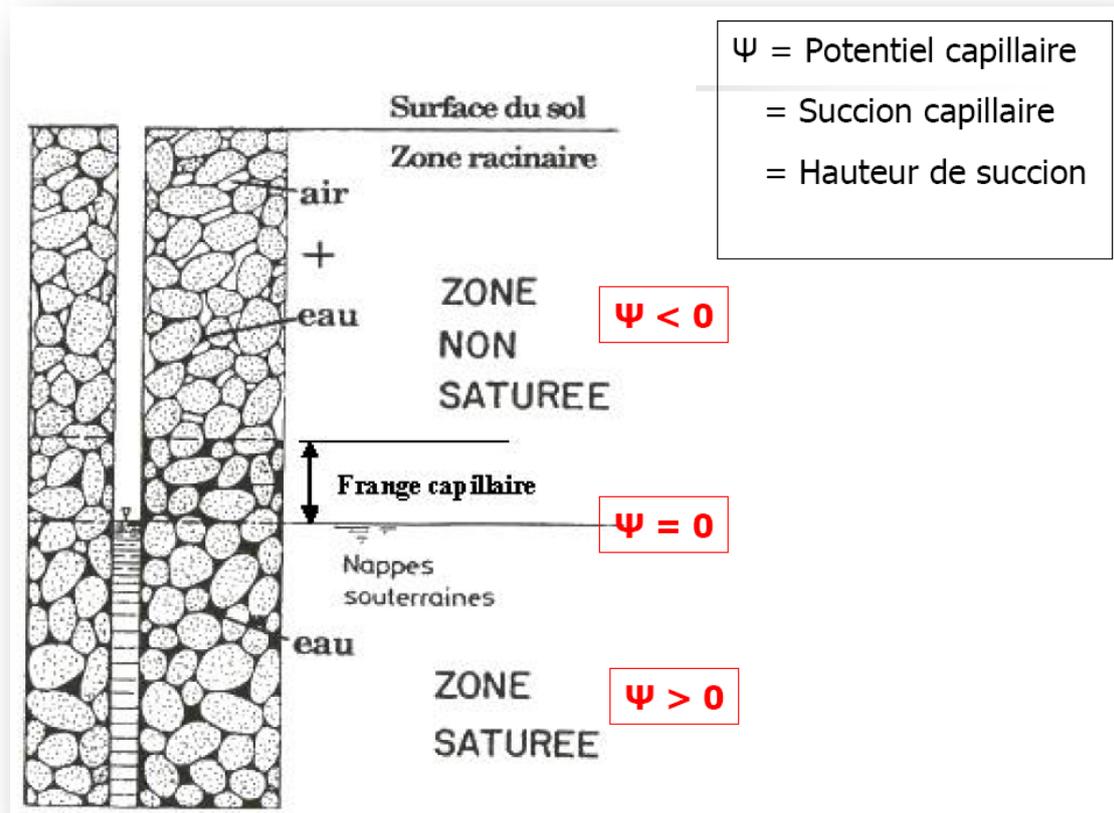


Figure V.2: Potentiel de l'eau dans le sol.

Source : Les sols et le cycle de l'eau.

V.2- L'excès d'eau :

V.2.1- Les cause :

L'excès d'eau dans un sol se traduit par la saturation des pores du sol, ce qui entraîne un déficit prolongé en oxygène, ce phénomène s'explique soit par l'existence d'une eau libre saturant progressivement le sol soit par la remontée capillaire de l'eau vers les horizons supérieurs.

Les précipitations sont les principales causes de l'excès d'eau, selon les climats, celles-ci sont plus ou moins importantes et coïncident avec des périodes de faible évapotranspiration de la couverture végétale, ces périodes correspondent, dans le cas de certaines zones du nord de l'Algérie, à la saison hivernale.

La généralisation de l'irrigation traditionnelle s'est accompagnée d'une gestion irrationnelle des stocks d'eau, bien souvent en effet, la dose d'irrigation apportée est supérieure aux besoins des cultures, la pratique de l'irrigation est dans de nombreux pays en développement une cause d'excès d'eau.

L'excès d'eau pourrait être causé soit par la remontée de la nappe d'eau souterraine (cas de Touggourt en Algérie) ou de la nappe superficielle (cas des Polders Hollandais).

Cependant, quelque soit l'origine de l'apport d'eau (précipitation, irrigation, remontée de la nappe), la présence d'horizon peu perméable à une faible profondeur favorise la saturation du sol et l'émergence de nappe superficielle. [18]

V.2.2- Le constat d'excès d'eau :

La stagnation d'eau dans les dépressions du sol et la difficulté pour l'agriculteur d'accéder au champ sont le premier témoignage d'un excès d'eau.

Une flore caractéristique de ces milieux se développe spontanément, il s'agit notamment du jonc commun ou agglomère le plantain lauréole, le colchique d'automne, le prêle queue de cheval, la renoncule, l'oseille crépue, le pâturin aquatique, la menthe, le mille pertuis des marines.

Cependant, ces éléments de constat peuvent être non visibles sur des terres hydro-morphes, une analyse plus fine des indices morphologiques du sol à différentes profondeurs doit être conduite ainsi, l'observation de « taches rouille » d'oxydation, de « taches grises » de réduction de fer, de concrétion ferromagnétique révèle aussi une situation d'excès d'eau.

Dans la mesure où la notion d'excès d'eau est liée au besoin du drainage, il convient de tenir compte de la durée de séjour de la nappe dans les horizons superficiels.[18]

V.2.3-Manifestation d'excès d'eau :

L'excès d'eau provoque un manque d'aération du système racinaire des plantes et favorise le développement de maladies cryptogamiques. Il agit sur la structure du sol en s'opposant à la pénétration des racines, il se manifeste principalement par:

- L'anoxie de la plante, c'est à dire l'asphyxie de ses racines en contact prolongé avec une eau non oxygénée, conduit progressivement au dépérissement de la plante. En outre, l'état phytosanitaire se dégrade à cause du maintien d'une humidité excessive dans l'environnement immédiat de la plante et une baisse de rendement est constatée par l'agriculteur.

Il n'est pas inutile, cependant, de noter que la restitution d'une culture à une inondation constitue un critère de dimensionnement du réseau de drainage. Plus une culture est résistante, plus ses exigences en drainage sont faibles.

- Pour les animaux, cela se traduit par un retard à la mise en herbe, du fait de la faible portance du sol et d'une production du fourrage de qualité moindre.
- Pour les opérations du travail du sol, l'excès d'eau provoque des perturbations dans le déroulement normal des pratiques culturales tout au long de l'année (retards des labours, semis, épandages d'engrais, récoltes, etc.)
- En climat aride et semi-aride, la succession des phases excès d'eau-évapotranspiration est responsable de la remontée capillaire des sels vers les horizons ergonomiquement utiles du sol. Ce phénomène tend à se généraliser suite à une intensification d'une irrigation.[18]

V.2.4- Lutte contre l'excès d'eau en fonction de la nature du sol :

Les techniques du drainage visent à éliminer les effets de l'excès d'eau par la régulation des flux qui transitent à travers le sol. Pour l'agriculteur, l'intérêt du drainage ne se justifie que par sa rentabilité économique à plus ou moins long terme, ce qui exige, entre autres, une bonne connaissance des propriétés du sol.

V.2.4.1-Sols à Gley et sols à tourbe :

Pour les sols à Gley, le drainage par drains enterrés est l'aménagement adéquat. Les modalités techniques (écartement, enrobages autour des drains, remblais de graviers, drainage taupe ou sous-solage associé) sont définies en fonction des caractéristiques hydrodynamiques et physiques des sols (susceptibilité au colmatage des tuyaux, sensibilité au tassement). Grâce au drainage et à une conduite culturale adaptée aux sols à Gley, qui ont généralement de bonnes potentialités agricoles et qui peuvent être valorisés par des cultures annuelles, des productions maraichères se substituant aux mauvaises prairies naturelles ou aux peupleraies.

Dans le cas des tourbes, surtout si elles sont épaisses, le drainage se fait uniquement par fossés ouverts, en maîtrisant le niveau d'eau. En effet, sans de telles précautions, des phénomènes importants de tassement de minéralisation voire de dessèchement peuvent intervenir. Cette utilisation agricole in situ des tourbières n'est pas exclusive. Le matériau tourbe peut être valorisé par d'autres voies après extraction: en tant que combustible ou comme support de cultures horticoles ou maraichères en conditions protégées telles que les serres.[18]

V.2.4.2- Sols à pseudo-Gley:

Le drainage des sols à pseudo-Gley, sols extrêmement répandus en pays tempérés fait appel aux techniques classiques du drainage par tuyaux enterrés en PVC annelés, posés par des draineuses-trancheuses ou par des draineuses sous-soleuses. Le drainage autorisant la réalisation des façons culturales en temps opportun (labour, semis, traitements, récolte) permet l'installation de cultures variées, régularise et améliore nettement la productivité des sols à pseudo-Gley.

Toutefois, ces sols rencontrés sur des formations géologiques divers (limons des plateaux, alluvions anciennes, roches sédimentaires, matériaux d'altération de roches granitiques, schisteuses...) présentent également d'autres contraintes pour la mise en valeur:

- Sensibilité des couches de surface au tassement, à la prise en masse (croule de battance) d'où le recours à des modes spécifiques de travail du sol : sous-solage périodique pour fissurer les couches de sol.

Il est, cependant, conseillé d'éviter les outils rotatifs et les disques car ils émiettent le sol.

- Sensibilité à la sécheresse par suite d'une profondeur d'enracinement limitée par la présence de la nappe perchée. Le drainage et le sous-solage, ainsi que l'irrigation d'appoint, permettent de lever cette contrainte.

• Très faibles réserves en éléments nutritifs (calcium, potassium, acide phosphorique) et en matières organiques après une culture intensive sans restitutions organiques, l'apport d'amendement calcaire et organique, d'engrais phospho-potassiques permet d'améliorer leur fertilité chimique.[18]

V.2.4.3- Sols à saturation capillaire prolongée :

Plusieurs modes du drainage sont utilisés pour éliminer l'eau en excès.

- Le drainage avec tuyaux enterrés lorsque le sol est à structure stable, nette, non plastique.
- Le drainage avec techniques associées.
- Le drainage-taupe ou sous-solage pour les sols argileux, plastiques, gonflants. Dans ce dernier cas, les drains sont surmontés de remblais poreux favorisant la circulation de l'eau dans le sol.

Des précautions particulières pour le travail du sol sont à prévoir pour la mise en valeur de ces sols lourds afin d'obtenir une bonne productivité (labour avant l'hiver, après ressuyage complet, tracteurs puissants).[18]

V.3- Objectifs du drainage en fonction du contexte climatique :

Dans les régions à climat tempéré, le drainage a pour rôle essentiel la lutte contre les excès d'eau hivernaux et printaniers afin d'améliorer l'aération du sol et de permettre l'accès au champ. Cependant, un intérêt croissant est accordé au drainage en tant que moyen d'élimination, par lessivage, d'une partie des engrais azotés apportés par l'agriculteur.

Dans certaines régions, l'irrigation est utilisée comme appoint durant la saison sèche. La question qui se pose est de savoir dans quelle mesure le drainage peut constituer une solution économique? L'économie est traduite par un meilleur développement des cultures, permettant une plus grande exploitation des réserves en eau de sol.

Par ailleurs, lorsqu'une couche du sol imperméable est proche de la surface ou lorsqu'une couche du sol perméable est comprise entre deux couches imperméables, la lame d'eau stockée aboutit à la formation de mouillère, le drainage vise aussi à traiter ce type d'excès d'eau fréquemment observé en zones humides.

Dans les régions à climat aride et semi-aride, l'eau destinée à l'irrigation provient essentiellement du sous sol. Le drainage a pour rôle essentiel de lutter contre la salinité provenant des eaux d'irrigation, phénomène qui affecterait 20à.30 Mha de sols dans le monde avec un rythme annuel de croissance des superficies concernées selon la FAO (1990) de l'ordre de 1 à 2Mha.

Dans le sud de l'Algérie où sévit un climat aride, d'importants volumes d'eaux chargés de sels sont utilisés pour irriguer des périmètres agricoles. Les quantités de sels déposées annuellement sont de l'ordre de 6000 kg à l'hectare. En absence de drainage, la situation de ces périmètres et de l'écosystème local est préoccupante (cas de la vallée de l'oued Rhir).

Finalement, il n'est pas sans intérêt de relever le couplage entre l'irrigation et le drainage en climat aride. La dualité des objectifs du drainage complexifie la définition des critères de conception adaptés à ce type de climat.[18]

Chapitre VI: DRAINAGE

VI.1- Introduction :

Le drainage est tout d'abord un mécanisme d'écoulement de l'eau, il désigne tout écoulement contribuant à vider un matériau poreux de liquide qu'il contient, la gravité est le premier moteur du drainage; lorsqu'un matériau est assez humide, les forces dues à la capillarité sont moindres que celles de la gravité, aussi l'eau s'écoule vers la profondeur si elle ne rencontre aucun obstacle, c'est le drainage naturel.

Dans les sols qui présentent un obstacle à l'écoulement, barrière imperméable ou semi-imperméable, l'eau s'accumule au-dessus de cette dernière formant une nappe, seul un drainage artificiel par des techniques appropriées, soit par gravité soit par pompage peut alors évacuer l'eau.

La deuxième acceptation du terme du drainage désigne la technique ou l'ouvrage réalisé pour permettre l'évacuation de l'eau excédentaire. Les techniques du drainage sont généralement classées ainsi.

VI.2- Situation du drainage agricole dans le monde :

La superficie mondiale drainée est estimée à 170Mha, dont 50 Mha de drainage par tuyaux enterrés (**LESAFFRE ET'AL, 1992**). Les statistiques actuellement disponibles montrent que les deux tiers des réseaux du drainage ont été construits dans les pays développés et que les deux tiers des réseaux d'irrigation ont été construits dans les pays en voie de développement. L'accroissement de la démographie mondiale a conduit ces pays à se lancer dans d'importants programmes d'irrigation afin d'augmenter les rendements agricoles.

Dans un premier temps, l'augmentation des apports d'eau permet un accroissement de la production agricole. Cependant, passé un certain seuil d'apport, la baisse des rendements devient inévitable en raison du déséquilibre entre les apports d'eaux chargées en sels et les capacités naturelles du drainage du sol.

Le drainage vise à remédier à cette situation en proposant des aménagements qui dépendent en grande partie du contexte climatique.

En Algérie, le drainage agricole suscite peu d'intérêt tant au niveau des agriculteurs qu'au niveau des autorités chargées d'élaborer la stratégie du développement agricole. Le déficit chronique en eau que connaît le pays a été aggravé par des pratiques irrationnelles d'irrigation causant un double effet : l'humidification excessive des terres agricoles et leur salinité.

D'autre part, certaines régions du nord reçoivent régulièrement des lames d'eau importantes comme c'est le cas dans la plaine agricole de **Tarf** où une pluviométrie annuelle de 2000mm est enregistrée. Ces apports d'eau répartis sur quatre à cinq mois, sont la cause de la submersion des terres ce qui entrave la conduite des pratiques agricoles et la croissance des cultures.

L'installation du drain devient une nécessité. [18]

VI.3- Principaux modes du drainage :

Bien souvent, avant de décider d'opter pour le drainage, l'agriculteur recherche des solutions palliatives moins coûteuses. Par exemple, lorsque l'excès d'humidité se trouve confiné dans les couches superficielles du sol, le labour profond peut s'avérer suffisant. Plus généralement, cette façon culturale revient à procéder à un sous solage qui consiste à briser les croûtes imperméables (50 à 90cm) et à accroître le drainage naturel du sol. On peut associer à cette technique l'apport d'amendement calcique afin d'améliorer la structure du sol.

Lorsque le choix d'installer un réseau du drainage est arrêté, deux variantes sont à envisager pour la conception du système drainant :

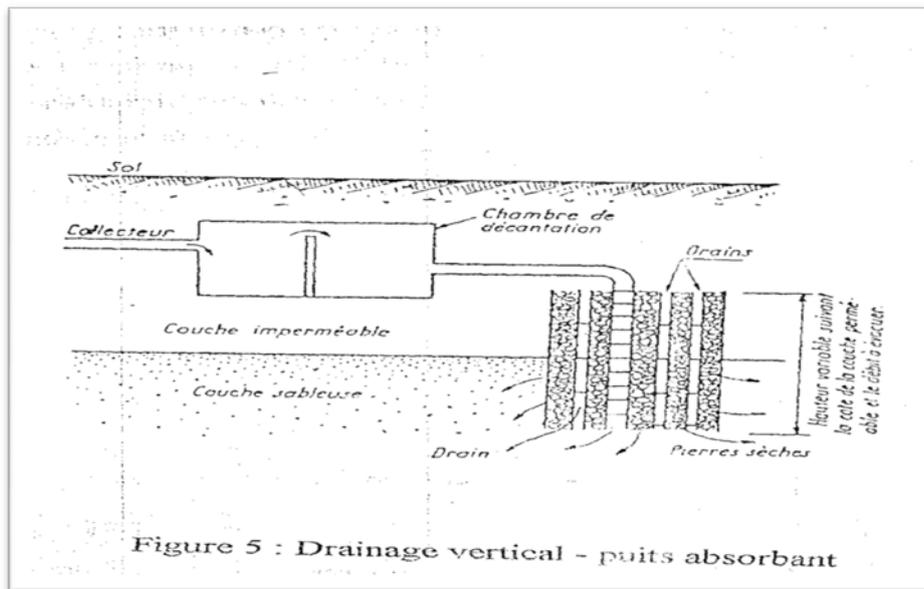
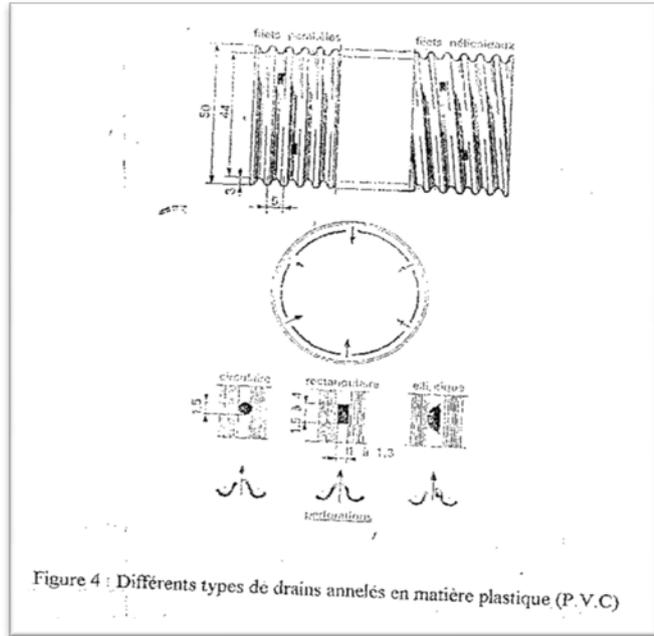
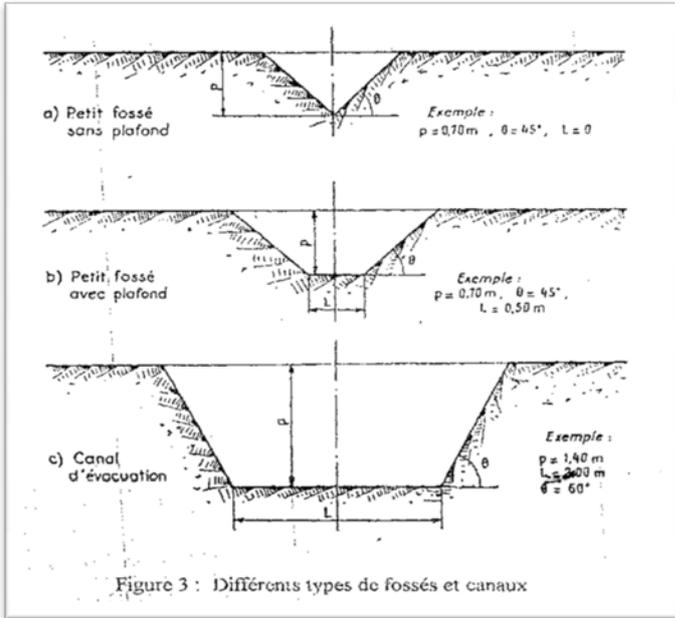
- Un drainage de surface horizontal.
- Un drainage vertical relativement profond.

La solution traditionnelle consiste à évacuer l'eau en excès, au moyen de fossés quasi horizontaux à ciel ouvert (figure 3). Cette méthode est économique mais présente quelques inconvénients parmi lesquels la perte de surface cultivable, difficultés d'accès aux parcelles, entretien onéreux et ainsi souvent différée. Même l'amélioration des propriétés du sol en remblayant les fossés présente quelques limites et cède le pas au drainage par canalisation enterrées.

La pratique actuelle, lorsque l'imperméable est peu profond, est celle du drainage par canalisations enterrées. Des canalisations de petit diamètre, appelées drains, comportent des orifices périphériques qui leur permettent de recueillir l'eau de saturation du sol (figure 4). Les files de drains horizontaux et régulièrement espacés, se jettent dans des canalisations plus grosses, les collecteurs, qui aboutissent à un émissaire qui peut être un fossé, un ruisseau ou une rivière. Les canalisations peuvent être en terre cuite, en matière plastique ou en ciment (buses pour les gros collecteurs).

Pour améliorer l'efficacité du drainage, des techniques associées sont envisagées. Cela consiste généralement à concevoir des tranchées gravillonnées et à ajouter des matériaux filtrants autour des drains. Dans les sols argileux, le transit des débits élevés vers les drains nécessite de creuser des galeries pour permettre à l'eau de s'écouler dans le sol ; on parle de drainage taupe.

Le drainage vertical consiste à rabattre la nappe verticalement au moyen de forages régulièrement espacés, traversant la couche imperméable et permettant à l'eau des horizons superficiels de s'écouler dans les couches les plus profondes et plus perméables du sous sol (figure 5). Le drainage vertical n'est possible que dans des situations géologiques très favorables. Il est très peu pratiqué en Algérie.[18]



VI.3.1- Drainage De surface :

La plupart de nos sols requièrent un drainage de surface. Une attention particulière doit être portée aux sols peu profonds et de faible perméabilité. Dans certains cas, le drainage souterrain n'est pas réalisable et l'aménagement de surface devient le mode d'assainissement à préconiser.

Règle générale : le drainage de surface vise à éliminer toute accumulation d'eau dans un délai de 24 heures.

VI.3.1.1- Définition :

Toute technique d'évacuation d'eau se trouvant à la surface du sol, généralement parce qu'elle n'a pas pu s'infiltrer.

VI.3.1.2- OBJECTIFS DU DRAINAGE DE SURFACE :

Une combinaison judicieuse du drainage souterrain et du drainage de surface permet de mieux répondre aux exigences des plantes et de la circulation de la machinerie agricole. Les objectifs du drainage de surface sont :

- D'assurer une répartition uniforme de la précipitation et favoriser son infiltration.
- D'évacuer les eaux qui ne peuvent pas s'infiltrer, sans toutefois causer l'érosion.
- De causer un minimum d'inconvénients aux opérations culturales et à la machinerie agricole.

VI.3.1.3- MÉTHODES D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉES :

Le choix de la méthode d'assainissement se fera d'après la connaissance des propriétés du sol et de la topographie du terrain. Selon les conditions du sol et des cultures, dans les terrains dont les pentes sont inférieures à 1 %, on pourra proposer un modelage du terrain en planches. Dans les terrains dont les pentes excèdent 1 %, des travaux d'aplanissement pour éliminer les cuvettes du terrain suffiront (tableau VI.1).[18]

Tableau VI.1: Différents aménagements possibles selon la pente

Pente du terrain	Aménagement
Inférieure à 0,3 %	Planche à deux versants à pente faible et constante
Entre 0,3 % et 1,0 %	Planche à 1 versant perpendiculaire à la pente du terrain
Supérieure à 1,0 %	Aplanissement, rigole d'interception et voie d'eau engazonnée

Source : Drainage de surface.

VI.3.2- Drainage Souterrain :

Le but consiste à accroître la conductivité hydraulique saturée K du sol. Classiquement, on fait appel au sous solage, il permet de briser les horizons de tassement, de remonter le sol sur une certaine profondeur et d'accroître aussi son aptitude au drainage naturel.

Sous solage fermier $\implies 50 \div 60$ cm

Sous solage industriel $\implies 70 \div 90$ cm

On peut associer sous solage, et amendement chimique (calcique) pour améliorer la structure.

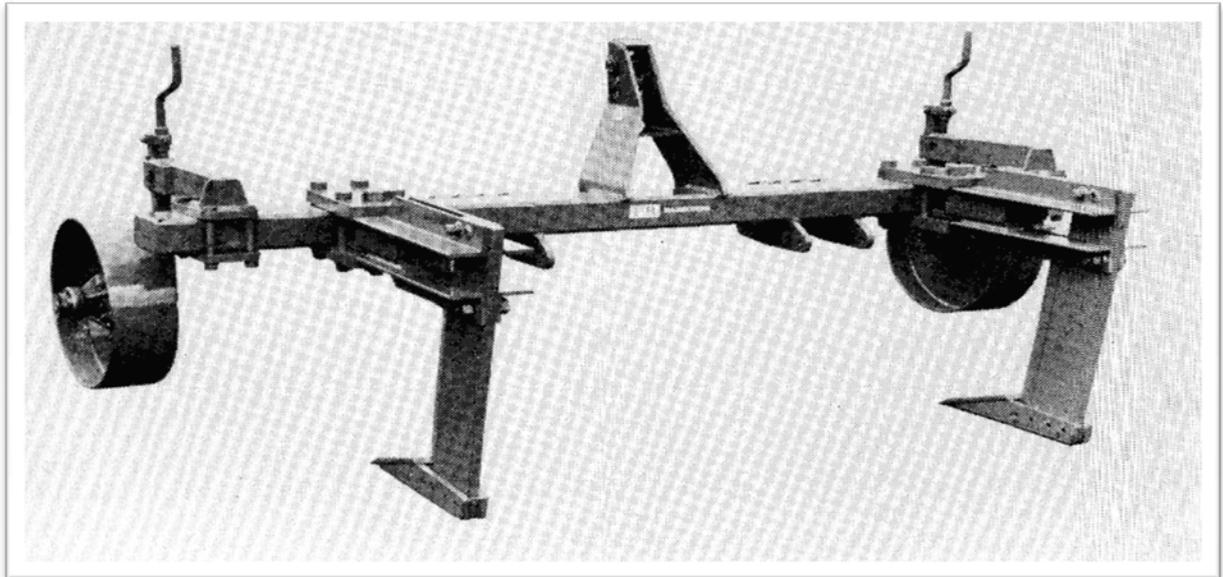


Figure VI.6:L'outil de sous solage.

source : Land drainage.

SYSTÈMES DU DRAINAGE-TAUPE

Un obus (taupe) fixé à une dent/à lame verticale est entraîné dans le sol laissant un tunnel (galerie taupe). La taupe est suivie d'un extenseur qui augmente et renforce légèrement les galeries.

Les galeries taupes formées ainsi normalement ont un diamètre d'environ 5-10 cm et sont espacées à chaque profondeur d'installation de 1.5-3.m, et habituellement entre 0.40-0.60 m au-dessous de la surface du sol, bien dans le sous-sol « imperméable ».[14]

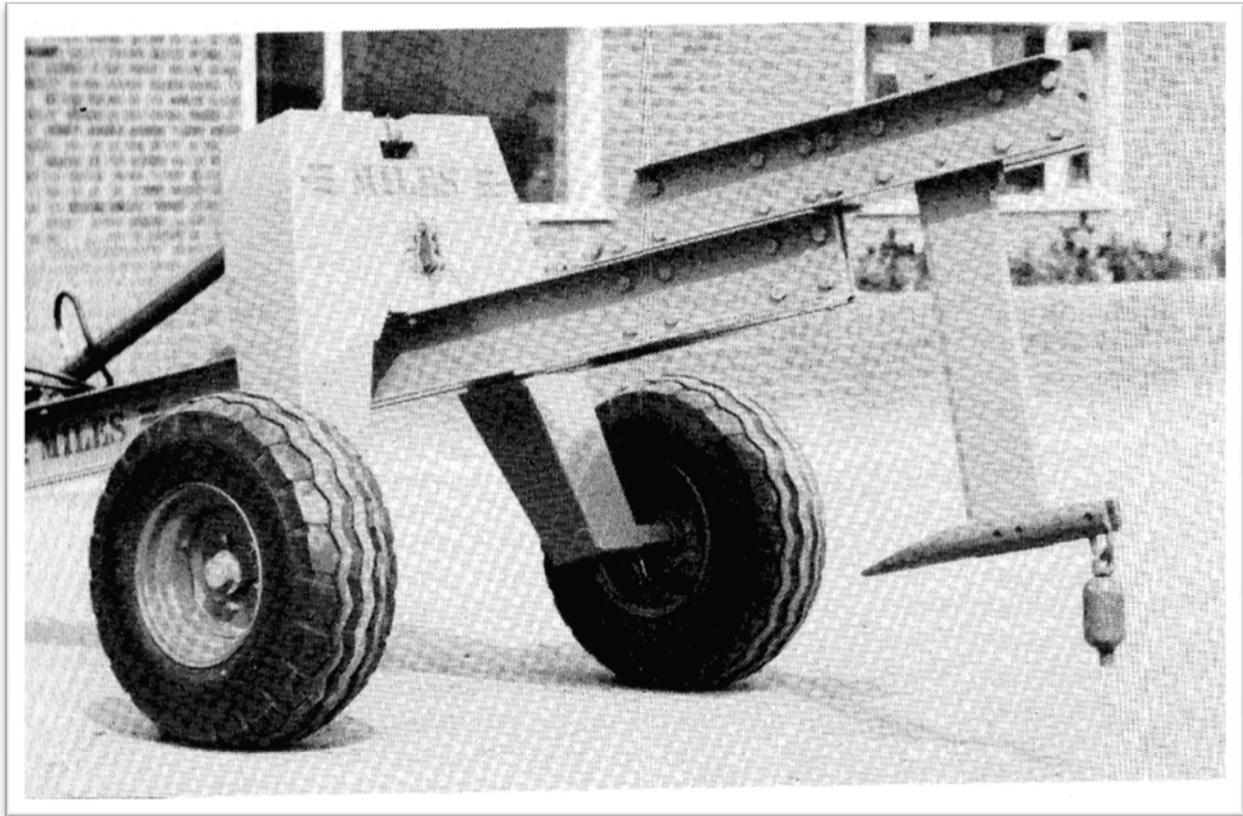


Figure VI.7: L'outil du drainage taupe.

Source : Land drainage.

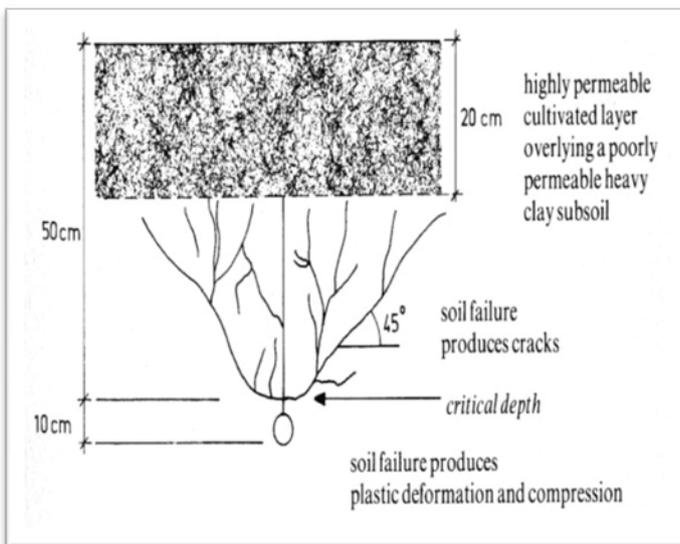
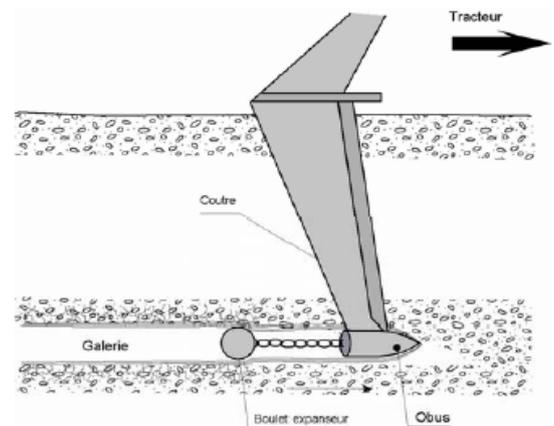


Figure VI.8: L'effet du drainage taupe.



Réalisation des galeries taupe

Source : Land drainage.

VI.3.3- Drainage Par fossé :

Technique très ancienne, qui consiste à creuser dans le sol à un intervalle régulier des fossés de profondeur >2 m et de largeur 0.3 à 0.5m, la fonction de ces fossés est double :

- 1- Interception de ruissellement superficiel et évacuation d'excès d'eau de surface.
- 2- Acheminement des eaux drainées par le fossé vers un exutoire, le plus souvent, une voie naturelle d'écoulement. [3]

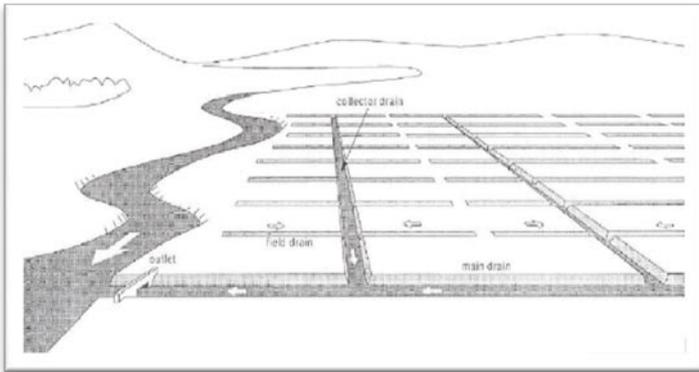


Figure VI.9 Réseau du drainage par fossé.



Figure VI.10: Fossé gazonné

Source : Drainage basic.

VI.3.3.1-Les avantages :

- Simplicité relative de mise en œuvre.
- Investissement peu élevé.

VI.3.3.2- Les inconvénients :

- Occupation du terrain.
- Gêne des façons culturales.
- Nécessité d'un entretien annuel, si on désire qu'ils gardent leur capacité.

VI.3.4- Fossés remblayés.

Consiste à placer au fond du fossé un matériau filtrant (ex : gravier) puis remblayer la tranchée avec le sol original.

Donc \implies Moins de perte du terrain.

\implies Moins d'entretien du curage.

Par contre, il risque d'y avoir un colmatage du matériau filtrant.

VI.3.5- Par drain enterré :

On remplace le fossé par un tuyau enterré et on met en communication son extrémité aval avec la pression atmosphérique.

Ce tuyau est pourvu d'ouverture ayant pour fonction de laisser passer l'eau du terrain, cette eau est évacuée en écoulement à surface libre par le tuyau, auquel on a donné une pente vers un collecteur, ce dernier peut être relié à un tuyau, un fossé ou une voie naturelle d'écoulement.

L'écoulement vers les tuyaux enterrés est provoqué par la différence de charge entre l'intérieur du tuyau (pression atmosphérique), et la nappe environnante.

L'écartement entre les files des tuyaux varie de 10 à plusieurs dizaines de m et la profondeur d'installation de 1 à 3m.[16]

VI.3.6- Puits du drainage :

Cas très particulier, on l'utilise quand il n'existe pas d'émissaire assez bas pour recevoir les eaux du drainage, et si la construction d'émissaire artificiel ou le pompage des eaux est trop coûteux.

VI.4- Le dimensionnement du réseau du drainage :

Pour aboutir au dimensionnement d'un réseau du drainage, il faudra distinguer deux aspects, d'une part le dimensionnement, et d'autre part les critères du dimensionnement, c'est-à-dire les facteurs sur lesquels se base ce dimensionnement.

- a. Dimensionnement du réseau du drainage : On peut distinguer les dimensions d'installation du réseau à savoir :
 1. Profondeur du placement des drains.
 2. Ecartement entre les files des drains parallèles.
 3. Pente des drains ou des fossés.
- b. Dimensions des équipements :
 1. Diamètres des drains, ou largeur du fossé.
 2. Longueur de files des drains.
 3. Dimension des collecteurs.
 4. Dimension des enrobages des drains.
 5. Dimension des équipements annexes (regards, bouches,...etc.).

VI.4.1- Les critères du dimensionnement :

Ce sont les données ou informations qui permettent de choisir, ou calculer les dimensions citées auparavant, ce sont principalement.

- 1- Critère agronomique \iff Durée de submersion admissible.
- 2- Niveau optimum de la nappe.
- 3- Caractéristiques des sols (conductivité, porosité, profondeur d'horizon imperméable, ..)

- 4- Volume d'eau à évacuer (pluviomètre, irrigation, lessivage ...).
- 5- Régime d'évacuation des eaux (permanant, variable).
- 6- Caractéristiques des terrains (dimension des parcelles, pentes, topographie, réseau hydrographique existant).

VI.4.1.1- Critère agronomique :

L'incidence des caractéristiques des cultures sur le dimensionnement des ouvrages du drainage se manifeste par l'intermédiaire de la sensibilité des différentes cultures à une submersion plus ou moins prolongée. Le tableau donné en **ANNEXE (A)** représente la chute du rendement en pourcents pour quelques cultures en fonction de la durée de submersion. Les résultats qui figurent dans ce tableau sont des valeurs expérimentales obtenues dans des conditions climatiques et agronomiques très particulières. Il est important de les considérer avec prudence car la sensibilité des plantes varie en fonction des espèces, des variétés, de l'âge et d'autres paramètres.

Cependant, on conçoit qu'en définitif, ce critère ne présente qu'un intérêt pratique restreint. En effet, sur le plan technique et compte tenu de toutes les variables du problème, il serait impossible de dimensionner un réseau du drainage en fonction d'une durée de submersion que l'on aurait fixée au préalable.

Le but que le projeteur se donne est l'évacuation immédiate de tous les débits atteignant un certain seuil fixe. Quant à savoir quelle sera la durée de submersion d'un périmètre pour une durée supérieure à ce débit fixé, la technique n'est pas la même que celle déterminée dans chaque cas particulier, précisément en raison du grand nombre de variables à prendre en considération. Finalement, le facteur sur lequel le projeteur peut agir est le niveau de la nappe dans le sol, qui peut être influencé efficacement par la profondeur à la quelle il installera le réseau du drainage.

Il est en effet nécessaire que le réseau du drainage soit placé à une profondeur de manière que le drainage ne provoque pas le dessèchement d'une culture donnée, tout en empêchant une autre culture de subir les effets néfastes de l'excès d'eau.

Une deuxième incidence des caractéristiques des cultures ou plus généralement de la couverture végétale, se fait sentir par l'intermédiaire du taux d'écoulement. La couverture végétale influence les phénomènes de condensation et d'évaporation et agit directement sur le ruissèlement et par conséquent sur la proportion d'eau infiltrée et ruisselée.[18]

VI.4.1.2- Profondeur optimale de la nappe :

- Une nappe trop proche de la surface peut créer des conditions d'asphyxie néfaste à la croissance normale des plantes.
- Une nappe trop profonde, par contre, ne participe pas à l'alimentation en eau des plantes.

Ainsi, on croit, qu'il existe une profondeur optimum de la nappe. Afin de déterminer ce niveau, plusieurs expériences ont été réalisées sur les parcelles à niveau de nappe constant pour divers types de culture. Cependant, il est difficile de le déterminer car il dépend de plusieurs facteurs.

- Type de culture, leur stade du développement.
- Type de sol.
- Condition climatique annuelle.
- Façon culturale.

On remarque toute fois, que la plupart des cultures poussent mieux quand le plan phréatique se trouve plus bas que leur zone racinaire normale, mais certaines cultures ne souffrent pas si le plan phréatique remonte pendant une brève période, le tableau suivant représente le rendement de certaines cultures en fonction de la remontée de la nappe.

Tableau VI.2: Variation du rendement en fonction du niveau de la nappe.

Profondeur de la nappe (cm)	Prairie (%)	Avoine (%)	Betterave (%)
20	36	13	-----
40	87	67	90
60	100	100	93
80	90	90	-----
100	-----	-----	99
140	-----	-----	100

Source : URSS.

Tableau VI.2: Profondeur optimum de la nappe en fonction de la culture et du type de sol.

Culture	Sols tourbeux (m)	Sableux (m)	Argilo-sableux (m)	Argileux (m)
Fourrage annuels	0.6	0.5	0.6	0.55
Pâturages	0.9	0.7	0.9	0.8
Céréales	0.8	0.6	0.8	0.7
Pomme de terre	0.9	0.8	1	0.9
Melon – pastique	1	0.85	1	0.9
Arbre – fruitiers	1.25	0.95	1.2	1.1

Source : URSS.

- Pour les plantes maraîchères et les plantes à bulbe, qui sont cultivées sur sol léger, l’optimum de nappe sera assez faible de l’ordre de 60 cm, parfois 30 cm.
- Les arbres fruitiers exigent le plus souvent des nappes profondes de 1.5 m à 2 m selon l’espèce.

VI.4.1.3- Notion du régime permanent et du régime variable du tarissement :

Pour évaluer les autres critères du dimensionnement, il faudrait au préalable, déterminer ou définir dans quel régime hydraulique on travail.

Différents facteurs dépendant du sol ou du régime de pluie jouent un rôle dans la détermination de la valeur de l'écartement et du débit du drain et il existe plusieurs méthodes faisant intervenir une partie de ces facteurs dans les formules appropriées de l'hydraulique sous terrain. On décrira ici les deux méthodes les plus courantes à savoir :

- a- Méthode du régime permanent.
- b- Méthode du régime variable de tarissement.

VI.4.1.4- Profondeur du placement des drains :

La profondeur du placement des drains est à la fois une dimension et un critère du drainage.

Le choix de la profondeur du placement du drain souhaité est celui qui nous satisfait pour le moindre coût aux critères relatifs à la maîtrise du plan phréatique. Les solutions offertes s'inscrivent dans une gamme de profondeur dont les valeurs extrêmes correspondent aux besoins de maîtrise :

- Du plan phréatique et de saturation.
- Des exigences économiques.
- Du facteur caractéristique de la situation locale.

La tendance actuelle serait plutôt à accroître la profondeur du placement afin de réaliser des systèmes plus économiques .En périmètre irrigué, les profondeurs recommandées seront plus grandes à cause des risques de salinisation.

Les recommandations moyennes préconisées par la FAO (1979) pour les zones arides et semi-arides sont les suivantes :

Tableau VI.3 : Profondeurs des drains en fonction du type du sol et du type de culture.

Culture	Sols fins perméables		Sols moyens		Sols grossiers	
	Régime permanent	Régime variable	Régime permanent	Régime variable	Régime permanent	Régime variable
Culture en plain champ	1.2	0.9	1.4	1.2	1	0.9
Maraîchage	1.1	0.9	1.3	1.1	1	0.9
vergers	1.6	1.4	1.6	1.4	1.2	1.1

Source : FAO(1979).

Ces valeurs sont en (m) et par rapport à la surface du sol.

En cas de pratiques d'irrigation déficientes (Mauvaises efficiences), ces valeurs sont plus sévères.

Dans le cas de jachère, et en zone déprimée menacée de salinisation, le minimum recommandé est de 1.4 m par rapport à la surface du sol dans le cas de texture grossière et à 1.7 m dans le cas de texture moyenne.

À partir de ces valeurs, la FAO propose de fixer la profondeur d'installation des drains de la manière suivante :

- 1- Régime permanent : Profondeur du drain = $P.I_m + (EM/2) + 0.1$ [m]
- 2- Régime variable : Profondeur du drain = $P.I_m + EM + 0.1$ [m]

$P.I_m$: Profondeur minimum imposée (de la nappe).

EM : Élévation maximum de la nappe suite à l'apport maximum d'eau (pluie , irrigation).

0.1m : Marge de sécurité.[18]

VI.4.1.5- Caractéristiques des sols :

Le sol doit assurer le transfert de l'eau jusqu'aux drains en agissant comme massif filtrant. Le choix d'une technique du drainage repose non seulement sur la connaissance des propriétés physico-chimiques d'un sol mais aussi sur la détermination de la profondeur de l'imperméable, lorsque celui-ci existe.

VI.4.1.6- Profondeur de la couche imperméable :

La nécessité d'installation d'un réseau du drainage est souvent due à la présence d'une couche peu perméable à relativement à faible profondeurs. Si on place les drains dans cette couche du sol, leur efficacité sera réduite, sinon il y a trois possibilités :

- 1- Placer les drains au-dessus de la couche imperméable pour autant qu'une profondeur minimum de 1 m soit respectée.
- 2- Placer les drains sur la couche imperméable avec un remblai de matériaux poreux.
- 3- Choisir un autre système du drainage.

VI.4.1.7- Topographie :

Les conditions topographiques peuvent imposer certaines limites en matière de profondeur.

- Terrain régulier, ou non.
- Position de l'exutoire.

VI.4.1.8- Coût de l'installation :

Le coût d'un réseau du drainage décroît avec l'accroissement de profondeur jusqu' à un optimum au-delà duquel l'accroissement des charges dues aux diamètres et à l'énergie devient supérieur à la diminution de l'espacement entre les drains.

VI.4.2- Dimensionnement :

Pour faire dimensionner un réseau du drainage, il faut passer par une série d'étapes dont l'ordre à suivre pour obtenir de bons résultats dépend principalement de l'origine de l'excès d'eau. [16]

VI.4.2.1- La pluie :

De toutes les données climatologiques (pluviomètre, ensoleillement, vent, neige, gelée, etc.), la pluie doit intéresser de plus le projeteur en drainage. De nombreuses données sur le pluviomètre ont une importance pour déterminer à priori un système et un mode de calcul du réseau.

En effet, dans une région où les pluies sont fréquentes et d'intensités moyennes très rapprochées dans le temps, on peut considérer que l'écoulement se fait en régime permanent.

En revanche, dans des régions où les pluies sont de forte intensité, mais laissant entre elles un temps suffisant pour leur évacuation, on peut supposer un rabattement variable de nappe dans le temps. Il suffit alors que la submersion ne dépasse pas une durée, jugée par les agronomes dangereuse pour les plantes, pour dire que le régime est variable.

Dans le premier cas, on calculera le réseau afin que le niveau de l'eau reste constamment à une certaine profondeur; dans le second cas, le niveau de l'eau est ramené à une profondeur acceptable, mais en quelques jours et en acceptant une submersion provisoire.

Cependant, si la connaissance globale et moyenne de la pluviométrie d'une région permet un choix de la méthode, elle est insuffisante pour le calcul lui-même.

En matière de pluies, plusieurs caractéristiques doivent être étudiées notamment l'intensité, la concentration et surtout la périodicité.

VI.4.2.1.1- La pluie critique :

On appelle pluie critique, la pluie égale à la durée critique de submersion et ayant un temps de récurrence égal à la "périodicité admissible de la submersion de durée critique".

En pratique, il y a tout d'abord lieu de considérer une période continue de données aussi longue que possible, une durée minimale de 25 ans étant indispensable. Il est possible ensuite de n'étudier que les mois les plus pluvieux, qui seuls intéressent le drainage.

Dans la série de pluies mesurées, on recherchera toutes les périodes pluvieuses de 2 à 10 jours voire plus. On peut ainsi déterminer des périodes critiques et étudier leur évolution et surtout leur place dans l'ensemble des périodes pluvieuses.

Le traitement statistique des pluies comprend donc le classement des données par ordre croissant, chacune étant affectée d'un numéro d'ordre. Il faudra ensuite ajuster à la distribution des fréquences observées, une loi statistique de distribution de probabilité, la loi de Montana, la loi de Gumbel, ou la loi log-normal.

La pluie recherchée est généralement déterminée à partir de la formule de Montana. L'intensité moyenne de celle-ci est exprimée en fonction de sa fréquence et de sa durée selon la relation:

$$I_p = a \cdot t^{-n} \dots\dots\dots (VI.1)$$

I_p : Intensité de la pluie.

à, n : Valeurs spécifiques à la station et au temps de récurrence.

Cette formule est généralement utilisable pour des durées supérieures à 5 heures, il existe d'autres formules que l'on peut utiliser comme celle de Talbot.

En drainage agricole, il est admis de prendre en compte les intensités des pluies de durée supérieure à un jour, l'effet de la submersion ou de la saturation de l'horizon superficiel du sol étant peu sensible, en grande culture, pour des pluies de moindre durée.

VI.4.2.1.2- Bilan hydrologique de la pluie critique :

Seule une partie de la pluie qui tombe sur une région, doit être évacuée.

- Une partie évaporée (E).
- Une partie infiltrée (I).
- Une partie ruisselée (R).

$P = E + I + R$, en divisant par P on aura :

$$1 = e + i + r$$

- **e** : Coefficient d'évaporation.
- **i** : Coefficient d'infiltration.
- **r** : Coefficient du ruissellement.

La valeur de chaque coefficient dépend du climat, du type du sol, du type de végétation et de la topographie.

VI.4.2.1.2.1- Évaporation :

Elle est fonction du climat et de la température, on peut avoir des valeurs considérables. [16]

- Terrain nu imperméable :e = 0.1
- Terrain laboure cultivé :e = 0.3
- Végétation dense - prairie :e = 0.5
- Végétation dense :e = 0.7

VI.4.2.1.2.2- Infiltration :

Elle est fonction de la nature du terrain; pour les terrains à faible pente, on admet : [16]

- Sable.....i = 0.8
- Limons-sableuxi = 0.5 - 0.8
- Limonsi = 0.4
- Limons-argileuxi = 0.2

La végétation augmente l'infiltration et ralentit le ruissellement; dans les terrains en pente, l'infiltration est moindre.

VI.4.2.1.2.3- Ruissellement :

Les mêmes facteurs interviennent sur sa valeur, la topographie, la nature du sol, et la végétation. [16]

- Dans les surfaces revêtues :r = 0.75-0.95
- Terrains nus à sol stabilisé (structure non charriée) : r = 0.1-0.3
- Terres de culture et prairie :r = 0.15-0.25
- Forêt en terrain plat :r = 0.015-0.05
- Forêt en terrain à pente :r = 0.05-0.2

Remarque

Ces chiffres indiqués pour i, e et r ne sont valables que pour une parcelle et pour un bassin versant. On parle d'un coefficient d'écoulement en connaissant la valeur de son coefficient, on peut estimer la quantité à évacuer par le réseau du drainage.

- Si le réseau est absent ou superficiel, la fraction à évacuer est égale à la fraction de ruissellement (r)
- Un réseau enterré n évacue que la partie infiltrée (i)
- Pour un réseau du drainage complet avec collecteur, la partie évacuée est i+r , cette partie (i+r) est égale à la valeur non évaporée (1-e). Grossièrement, on admet pour 1- e les valeurs :
 - Prairie.....0.5—0.6
 - Céréale.....0.6—0.8
 - Cultures maraichères.....0.8—0.9

VI.4.2.2- Débit caractéristique :

VI.4.2.2.1- Définition

Le débit caractéristique q_c est le débit par unité de surface à véhiculer par le réseau pour évacuer la pluie critique. Le calcul du débit se fait de plusieurs manières pour les deux régimes du drainage en tenant compte ou non le stockage.

VI.4.2.2.2- Débit caractéristique en régime permanent sans stockage :

Soit l'intensité de la pluie i_p critique qui tombe en un durée (θ jour), on suppose que la fraction de cette pluie à drainer par le réseau est la somme de ruissellement et de l'infiltration ($r+i=1-e$)

Le débit est :

$$q_c = (1 - e)i_p \quad \left[\frac{mm}{h} \right] \dots \dots \dots (VI.2)$$

$$q_c = \frac{(1-e)}{0.36} i_p \left[\frac{l}{s} \right] / ha \dots \dots \dots (VI.3)$$

Cette méthode convient dans le cas où il n y a pas de données spécifiques concernant la zone à drainer ou lorsqu'on connaît par expérience la valeur de (1-e).

VI.4.2.2.3- Débit caractéristique en régime permanent avec stockage :

Si on connaît l'évaporation et la caractéristique du sol, on est en mesure de déterminer plus exactement le Q caractéristique en tenant compte du stockage temporaire dans le sol.

Alors le débit caractéristique est donnée par :

$$q_{cr} = \frac{P-E-S}{\theta} \quad \longrightarrow \quad \left[\frac{mm}{j} \right] q_{cr} = \frac{P-E-S}{\theta} \cdot \frac{1}{8,64} \quad [l/s/ha] \dots \dots \dots (VI.4)$$

- E : Évaporation mesurée pendant le jour de pluie.
- S : Stockage dans le sol suite à une remontée temporaire de la nappe. [16]

VI.4.2.2.4- En régime variable :

Dans les régions où le climat impose un régime variable, averse de grande intensité avec de période inter pluviale assez longue, le calcul du débit est en fonction de la capacité du stockage.

Le rôle du réseau du drainage en régime variable est de rabattre le niveau de la nappe au niveau initial dans un délai déterminé θ .

Le débit est donc :[18]

$$q_c = \frac{S}{\theta} [\text{mm/j}] \text{-----} q_c = \frac{S}{\theta} \cdot \frac{1}{8,64} [\text{l/l/s/ha}] \text{.....(VI.5)}$$

$$s = \Delta H = \Delta h * u\%$$

ΔH : S: Stockage.

Δh : Variation de la charge dans le sol.

$U\%$: Porosité efficace.

$$u = \frac{\text{volume de pores remplis d'air après ressuillage}}{\text{volume total du sol}}$$

u : Fraction de la porosité totale (macroporosité).

$u = \sqrt{K}$ **Formule d'ERKIM** avec : $U[\%]$; K [cm/j]

$$u(\%) = H_{sat} - H_{cr}$$

Avec : H_{sat} : Humidité à la saturation.

H_{cr} : Humidité à la capacité de rétention.

Valeur de u en fonction de la texture :

- Sols très argileux → $u = (1 - 2)\%$
- Sols limoneux à limono-argileux à bonne structure → $u = (4 - 8) \%$
- Sables fins → $u = (15 - 20)\%$
- Sables grossier → $u = (25 - 35)\%$

Pour déterminer la variation de charge ΔH , il faut d'abord déterminer la charge au-dessus du drain et la profondeur optimale qui correspond aux différentes plantes.

Le tableau résume les profondeurs optimales en fonction des plantes ANNEXE (A).

VI.4.2.2- Irrigation [12]

Les besoins en eau des cultures peuvent être définis comme la dose apportée à la plante dans des moments propices afin de mettre celles-ci dans les meilleures conditions d'humidité requises pour obtenir son rendement maximal.

L'évaluation des besoins en eau du périmètre est basée sur la détermination des besoins de chaque culture retenue dans le calendrier agronomique.

Pour cela on définit :

VI.4.2.2.1- L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est un phénomène complexe intégrant à la fois, l'évaporation de l'eau du sol (phénomène physique) et la transpiration de la couverture végétale (phénomène physiologique). Donc on la considère comme la totalité de la consommation d'eau d'une plante en place

On distingue :

VI.4.2.2.2- L'évapotranspiration de référence (ET_0 ou ET_P) :

On peut la définir comme étant : C'est le taux de l'évapotranspiration d'une surface du gazon vert ayant une hauteur uniforme de 8 à 15cm, poussant activement, ombrant complètement le sol et ne manquant pas d'eau.

VI.4.2.2.3- L'évapotranspiration réelle (ET_R) :

C'est la valeur réelle de l'évapotranspiration, le plus souvent, elle est inférieure à l'évapotranspiration potentielle, car le sol n'est pas en permanence à sa capacité de rétention.

En plus, elle est considérée variable pendant la période de végétation.

Elle est donnée par l'expression (VI -6) :

$$ET_{CULTURE} = K_C \times ET_0 \dots\dots\dots(VI -6)$$

Avec :

K_C : Coefficient cultural dépendant du type de la culture, de son stade du développement, et des conditions climatique qui y règnent.

VI.4.2.2.4- Méthodes d'évaluation d'évapotranspiration de référence (ET_0 ou ET_P) :

L'évapotranspiration potentielle peut être évaluée selon plusieurs possibilités parmi lesquelles :

- Évapotranspiromètre (mesure directe).
- Stations expérimentales.
- Méthode du bilan hydrique.
- Méthode du bilan thermique.
- Formules empiriques.

Il existe plusieurs formules empiriques parmi lesquelles :

- ✓ Formule de Blaney-Criddle.
- ✓ Formule de Turc.
- ✓ Formule d'Ivanov (URSS).
- ✓ Formule de Penman.
- ✓ Formule de Messahel.

VI.4.2.2.5- Évaluation des besoins nets en eau des cultures :

Les besoins en eau des cultures sont calculés par :

$$B_{net} = ET_{CUT} - (P_{eff} + RFU)$$

Avec : - ET_{CUL} : Évapotranspiration de la culture considérée.

- P_{ef} : Pluie efficace ; telle que : $P_{eff} = \alpha \cdot P_{80\%}$

α : Coefficient tenant compte de l'efficiencia des pluies.

$P_{80\%}$: Précipitations mensuelles de l'année du calcul (l'année de fréquence 80% ou l'année sèche. On l'obtient après un traitement statistique).

- RFU : Réserve Facilement Utilisable (en mm) ; telle que :

$$RFU = y.Z.(H_{CC} - H_{PF})$$

Z : Profondeur d'enracinement de la culture considérée.

H_{CC} : Humidité à la capacité au champ.

H_{PF} : Humidité au point de flétrissement.

Y : Facteur dépendant de la nature du sol et du type de la culture.

VI.4.2.2.6- Efficience du système d'irrigation :

Les besoins en eau théoriques définis ci-dessus doivent être satisfaits intégralement au niveau des plantes, mais le réseau d'irrigation doit être prévu pour transporter des volumes d'eau supérieurs de manière à compenser les pertes d'eau à la parcelle et dans le réseau.

VI.4.2.2.6.1- Pertes d'eau à la parcelle :

Ces pertes varient dans une large mesure selon :

- La technique d'arrosage utilisée.
- Les caractéristiques physiques des sols irrigués.
- La plus ou moins bonne technicité des irrigants.

Pour une technicité moyenne de l'irrigant, c'est le facteur sol qui est prépondérant avec des réseaux bien conçus des champs bien nivelés et des pratiques d'irrigation conduites de manière optimale, on peut adopter les valeurs suivantes : (voir tableau VI-4)

Tableau VI-4 : Pertes d'eau à la parcelle.

Texture des sols	Légère	Moyenne	Lourde
Pertes par ruissellement	0.05	0.10	0.20
Pertes par percolation	0.35	0.15	0.10
Pertes totales	0.40	0.25	0.30

^(*)Source : Etude comparative des modes d'adduction-phase 3-annexe1-

VI.4.2.2.6.2- Pertes d'eau dans le réseau :

Ces pertes varient suivant le type du réseau et son mode de fonctionnement.

VI.4.2.2.6.3- Efficience globale :

On obtient finalement l'efficience globale du projet en multipliant l'efficience à la parcelle e_1 par l'efficience du réseau de distribution e_2 .

Donc: $E = e_1.e_2$

e_1 : Pertes d'eau dans le réseau.

e_2 : Pertes d'eau à la parcelle.

VI.4.2.2.7- Évaluation des besoins bruts en eau des cultures :

C'est la dose fournie à partir de la source pour assurer les besoins nets au niveau de la plante, le besoin est donné par :

$$B_{brut} = \frac{B_{net}}{E}$$

Avec : B_{bryt} : Besoins bruts en eau.
 B_{net} : Besoins nets en eau.
 E : Efficience globale.

VI.4.2.2.8- Fréquences d'arrosages :

La fréquence des arrosages est le nombre d'irrigation par mois, elle sera d'autant plus grande que la valeur du tour d'eau est faible.

$$N = \frac{B_{brut}}{dp}$$

Avec : B_{bryt} : Besoins bruts en eau.
 dp : Dose pratique $dp=RFU$.
 N : Fréquences d'arrosages.

VI.4.2.2.9- Espacement d'irrigation (ess) :

Il est défini comme étant : C 'est la durée entre deux irrigations successives.

$$ess = \frac{\text{nombre de jours du mois considéré}}{N}$$

Avec : ess : Espacement d'irrigation.
 N : Fréquences d'arrosages.

VI.4.2.2.10- Détermination du débit du drainage :

C'est la quantité d'eau en excès qu'il faut drainer pour éviter tout risque d'excès d'eau au niveau de la zone racinaire.

Alors la lame à drainer (Ld) est donnée par :

$$Ld = (B_{brut} - B_{net})$$

Avec : Ld : Lame à drainer.
 B_{bryt} : Besoins bruts en eau.
 B_{net} : Besoins nets en eau.

On peut définir le débit par :

$$Qc = \frac{Ld}{ess.N}$$

Avec : Ld : Lame à drainer.
 N : Fréquences d'arrosages.
 ess : Espacement d'irrigation.

VI.4.2.3- Lessivage :

C'est l'excès d'eau provenant de la dose du lessivage qui est définie par :

$$LR = \frac{DW}{Iw}$$

Avec : La lame d'irrigation est donnée par :

$$Iw = Dw + ETM$$

Donc :

$$Dw = \frac{ETM.LR}{1 - LR}$$

Avec : LR : Dose du lessivage.
ETM : Évapotranspiration maximale de la plante concernée.
Iw : Lame d'irrigation.
Dw : Lame à drainer.

Alors, le débit du drainage est donné par :

$$Qc = \frac{Dw}{ess.N}$$

Avec : Dw : Lame à drainer.
N : Fréquences d'arrosages.
ess : Espacement d'irrigation.

Conclusion :

Pour aboutir au débit du dimensionnement d'un réseau du drainage, il faut prendre en considération tous les critères du dimensionnement, en plus il faut savoir l'origine de l'excès d'eau à évacuer.

Si on arrive à un cas où nous avons tous les types d'excès d'eau (pluie, irrigation, dose du lessivage,...), on prend la valeur maximum entre les valeurs trouvées pour le débit.

Chapitre VII:
L'ÉCOULEMENT
SOUTERRAIN

VII.1- Introduction

L'eau pénètre dans le sol par infiltration, les zones de recharges peuvent être au voisinage direct de la nappe ou très loin de cette dernière. L'écoulement souterrain dépend des conditions existantes dans le milieu poreux, l'eau peut s'accumuler soit dans les interstices existantes entre les grains constituant le sol (sable, gravier...etc), soit dans les fissures et les crevasses des roches et des formations calcaires pour former les aquifère.

L'eau souterraine est une composante très importante du cycle de l'eau car elle représente 23% de l'eau douce dans le monde, sachant que près de 77 % de l'eau douce est des glaciers.

Dans les études du drainage, nous nous intéressons qu'à la variation de la profondeur de la nappe phréatique, à l'ascension, mais aussi au débit des eaux souterraines et à la vitesse à laquelle elles s'écoulent.

Afin de simplifier le régime d'écoulement, on émet des hypothèses. Il est à noter que les équations de ce chapitre sont destinées à l'utilisation directe dans la conception du drainage,[7]

VII.2- Écoulement souterrain en drainage

Dans le drainage souterrain, les drains sont utilisés pour contrôler la profondeur de la nappe phréatique et le niveau de salinité dans la zone racinaire en évacuant les eaux souterraines en excès. Notre analyse se limitera aux drains parallèles, qui peuvent être soit des fossés à ciel ouvert ou tuyau enterré. Les relations varient entre les propriétés de la vidange (diamètre, profondeur et espacement), la caractéristique du sol (profil et conductivité hydraulique), la profondeur de la nappe phréatique et le débit correspondant.

VII.3- L'équation HOOGHOUDT :

Considérons un écoulement en régime permanent, selon la théorie de **DUPEIT-FORCHHEIMER**, l'équation de Darcy peut être appliquée pour décrire l'écoulement des eaux souterraines (q_x) par un plan vertical (Y) à une distance (x) du fossé.

$$q_x = K \frac{dy}{dx} \dots \dots \dots (VII.1)$$

Avec :

- q_x = Débit unitaire dans la direction (x-x) (m^2 / j).
- K = Conductivité hydraulique du sol (m / j).
- Y = Hauteur de la nappe phréatique en x (m).
- $\frac{dy}{dx}$ = Gradient hydraulique à x (-).

Le principe de continuité exige que toute l'eau entrant dans le sol à partir de la surface se répartisse entre les drains, et le plan vertical (y) à la distance (x) à la limite du drain.

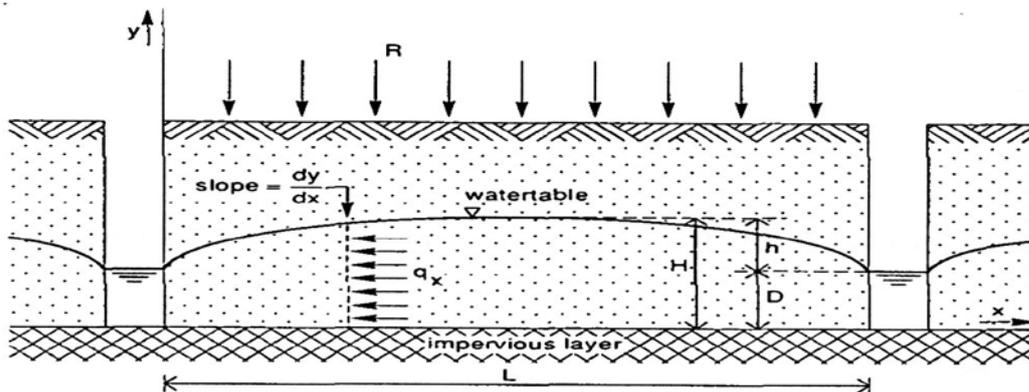


Figure 8.2 Flow to vertically-walled drains reaching the impervious layer

Source : Drainage principal.

Si R est le taux de recharge par unité de surface, et par unité de temps, le débit à travers le plan(y) est

$$q_x = R\left(\frac{1}{2}L - x\right) \dots \dots \dots (\text{VII.2}).$$

- Où
 - R = Taux de recharge par unité de surface (m / j).
 - L =Espace de fossé (m).

Comme le débit dans les deux cas doit être égal, nous pouvons assimiler le côté droit des équations VII.1 et VII.2

$$Ky \frac{dy}{dx} = R\left(\frac{1}{2}L - x\right)$$

On peut aussi écrire :

$$Kydy = R\left(\frac{1}{2}L - x\right)dx$$

Les limites de l'intégration de cette équation différentielle sont :

Pour : $x=0 \longrightarrow y=D$

$X=(1/2)L \longrightarrow y=H$

Où :

- D = Élévation du niveau d'eau dans le drain(m).
- H = Altitude de l'mi-distance entre la nappe phréatique des drains (m).

Intégrer l'équation différentielle et en remplaçant les limites des valeurs.

$$L^2 = \frac{4k(H^2 - D^2)}{R}$$

Ou :

$$q = R = \frac{4k(H^2 - D^2)}{L^2} \dots \dots \dots (\text{VII.3})$$

Avec :

- q = Débit du drain (m / j).

Cette équation, qui à été déterminée par HOOGHOUTD en 1936, est également connue comme l'équation de DONNAN (DONNAN, 1946).

L'équation VII.3 peut être réécrite comme :

$$q = \frac{4k(H - D). (H + D)}{L^2}$$

De la figure VII.2, il s'en suit que H -D= h et donc H+ D = 2D+ h, où h est la hauteur de la nappe phréatique au-dessus d'un niveau d'eau dans le drain. Par la suite, l'équation VII.3 est devenue.

$$q = \frac{8kDh + 4kh^2}{L^2} \dots \dots \dots (\text{VII.4})$$

Si le niveau d'eau dans le drain est très faible (D=0), l'équation VII.4 aux changements

$$q = \frac{4kh^2}{L^2} \dots \dots \dots (\text{VII.5})$$

Cette équation décrit l'écoulement au-dessus du niveau du drain.

Si la couche imperméable est bien en dessous de niveau drain (D »h), le deuxième terme de l'équation VII.4 peut être négligé, ce qui donne :

$$q = \frac{8kDh}{L^2} \dots \dots \dots (\text{VII.6})$$

Cette équation décrit l'écoulement en dessous du niveau de drain.

Ces considérations conduisent à la conclusion que, si le profil du sol est constitué de deux couches avec différentes conductivités hydrauliques, et si le niveau du drain est à l'interface entre les couches du sol, l'équation 8.4 peut être écrite comme

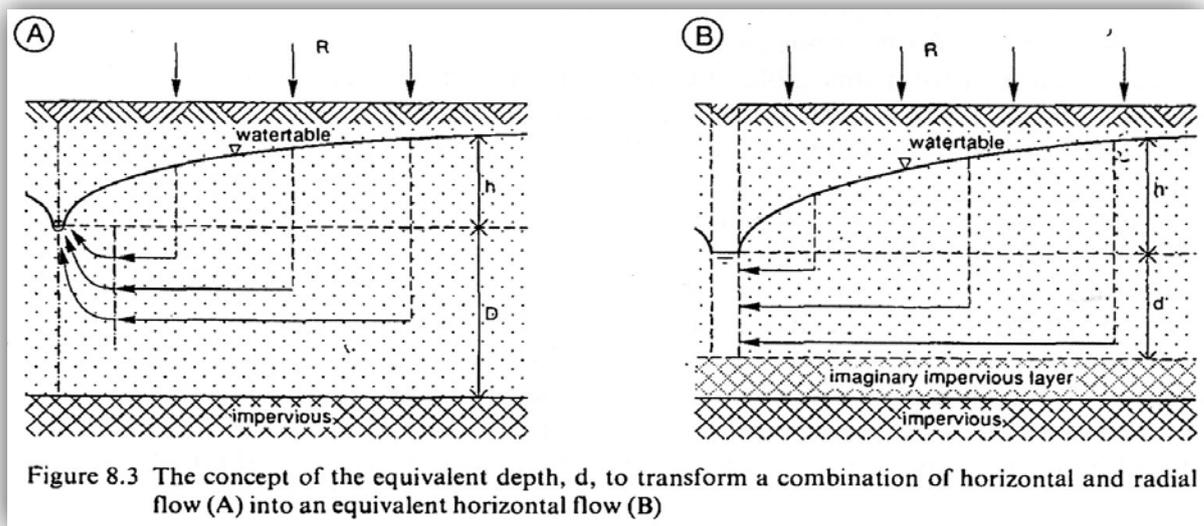
$$q = \frac{8k_b Dh + 4k_t h^2}{L^2} \dots \dots \dots (\text{VII.7})$$

Où

- K = Conductivité hydraulique de la couche au-dessus du niveau du drain (m / j).
- K_b = Conductivité hydraulique de la couche en dessous du niveau du drain (m / j).

Cette situation est tout à fait courante, le niveau ci-dessus de drain de sol étant souvent plus perméable

Qu'au-dessous du niveau du drain. Si le drain ou les fossés n'atteignent pas l'horizon imperméable, les lignes d'écoulement convergeront vers le drain et ne seront ainsi plus horizontales (figure VIII.3)



Source : Drainage principale.

Pour être en mesure d'utiliser le concept d'écoulement horizontal, Hooghoudt (1940) on à introduit deux simplifications (Figure VIII, 3 B):

- On imagine un plancher imperméable imaginaire au-dessus de le vrai, qui diminue l'épaisseur de la couche par laquelle les écoulements d'eau vers les drains ;
- On suppose les drains par les fossés imaginaires avec leurs fonds qui reposent sur le plancher imperméable imaginaire.

Avec ces hypothèses, nous pouvons encore utiliser l'équation VII.4 pour exprimer l'écoulement vers les drains, en remplaçant simplement la profondeur réelle de la couche imperméable (D) avec une profondeur inférieure équivalente (d). Cette profondeur équivalente (d) représente la couche du sol mince imaginaire à travers lequel la même quantité d'eau s'écoule par unité de temps que dans la situation réelle. Ce débit plus élevé par unité de surface présente une perte de charge supplémentaire, qui représente la perte de charge provoquée par les lignes de flux convergents. Ainsi l'équation VII.4 peut être réécrite comme

$$q = \frac{8kdh+4kh^2}{L^2} \dots \dots \dots \text{(VII.8)}$$

Le seul problème qui reste est de trouver une valeur pour la profondeur équivalente d . Sur la base de la méthode des images miroir de', HOOGHOUTD dérivée d'une relation entre la profondeur équivalente (d) et, respectivement, l'espacement (L), la profondeur de la couche imperméable (D), et le rayon du drain (r_0). Cette relation, est sous forme de séries infinies, est assez complexe. HOOGHOUTD donc préparé les tables pour les tailles les plus courantes des tuyaux du drainage, à partir de laquelle la profondeur équivalente (d) peut être lue directement. Tableau 8.1 (pour $r = 0,1$ m) est une table par exemple.

Comme on peut le voir dans ce tableau, la valeur de d augmente avec D jusqu'à $D=1/4L$. Si la couche imperméable est encore plus profonde, la profondeur équivalente reste approximativement constante, c'est apparemment la configuration de l'écoulement n'est alors plus affecté par la profondeur de la couche imperméable.

De plus, l'espacement des drains (L) dépend de la profondeur équivalente (d), qui est son tour une fonction de l'équation 7.8 peut être résolue par itération. Comme cette méthode de calcul avec l'utilisation de tables est assez fastidieux, Van Beers (1979) a préparé un nomogramme à partir duquel on peut facilement lire .

Ou :

$$x = \frac{2\pi D}{L} \dots\dots\dots(\text{VII.10})$$

Et :

$$F(x) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth(nx) \dots\dots\dots(\text{VII.11})$$

$$d = \frac{\frac{\pi L}{8}}{\ln\left(\frac{L}{\pi r_0}\right) + F(x)} \dots\dots\dots(\text{VII.9})$$

La fonction $F(x)$, qui représente une série infinie de logarithmes peut être modifiée pour être comme suit :

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1-e^{-2nx})} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \dots\dots\dots(\text{VII.12})$$

Table 8.1 Values for the equivalent depth d of Hooghoudt for $r_0 = 0.1$ m, D and L in m (Hooghoudt 1940)

L →	5 m.	7.5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	L →	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	150	200	250	
D												D														
0.5 m	0.47	0.48	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.75	0.60	0.65	0.69	0.71	0.73	0.74	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76	1	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
1.00	0.67	0.75	0.80	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.96	0.96	2	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
1.25	0.70	0.82	0.89	1.00	1.05	1.09	1.12	1.13	1.14	1.14	1.15	3	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1.50	0.70	0.88	0.97	1.11	1.19	1.25	1.28	1.31	1.34	1.35	1.36	4	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
1.75	0.70	0.91	1.02	1.20	1.30	1.39	1.45	1.49	1.52	1.55	1.57	5	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
2.00	0.70	0.91	1.08	1.28	1.41	1.5	1.57	1.62	1.66	1.70	1.72	6	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72
2.25	0.70	0.91	1.13	1.34	1.50	1.69	1.69	1.76	1.81	1.84	1.86	7	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86
2.50	0.70	0.91	1.13	1.38	1.57	1.69	1.79	1.87	1.94	1.99	2.02	8	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
2.75	0.70	0.91	1.13	1.42	1.63	1.76	1.88	1.98	2.05	2.12	2.18	9	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
3.00	0.70	0.91	1.13	1.45	1.67	1.83	1.97	2.08	2.16	2.23	2.29	10	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29
3.25	0.70	0.91	1.13	1.48	1.71	1.88	2.04	2.16	2.26	2.35	2.42	12.5	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42
3.50	0.70	0.91	1.13	1.50	1.75	1.93	2.11	2.24	2.35	2.45	2.54	15	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
3.75	0.70	0.91	1.13	1.52	1.78	1.97	2.17	2.31	2.44	2.54	2.64	17.5	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
4.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.81	2.02	2.22	2.37	2.51	2.62	2.71	20	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
4.50	0.70	0.91	1.13	1.52	1.85	2.08	2.31	2.50	2.63	2.76	2.87	25	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87
5.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.15	2.38	2.58	2.75	2.89	3.02	30	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
5.50	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.43	2.65	2.84	3.00	3.15	35	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15
6.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.48	2.70	2.92	3.09	3.26	40	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26
7.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.54	2.81	3.03	3.24	3.43	45	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43
8.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.57	2.85	3.13	3.35	3.56	50	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
9.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.57	2.89	3.18	3.43	3.66	60	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
10.00	0.70	0.91	1.13	1.52	1.88	2.20	2.57	2.89	3.23	3.48	3.74	∞	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74
∞	0.71	0.93	1.14	1.53	1.89	2.24	2.58	2.91	3.24	3.56	3.88															

Qui converge rapidement pour $x > 1$. Pour $x \ll 1$, la convergence est lente, mais pour ce cas (c'est-à-dire $x < 0,5$), une comparaison avec les résultats des formules de Dagan donne une approximation très précise

$$F(x) = \frac{\pi^2}{4x} + \ln\left(\frac{x}{2\pi}\right) \dots \dots \dots \text{(VII.13)}$$

Les solutions exactes présentées dans les équations VII.9 à VII.13 peuvent être facilement utilisées dans les calculs informatiques. Un diagramme de flux, basée sur cette solution, est présenté dans la figure VII.4

Deux conditions sur lesquelles HOOGHOUTD a basé sa théorie n'ont pas été encore mentionnées. Ces conditions sont :

- Drains fonctionnent à moitié pleine.
- Drains n'ont pas de résistance d'entrée.

Ces hypothèses impliquent que la zone d'entrée, u , est égale au périmètre mouillé d'un demi-cercle (πr_0 , dans l'équation VII.9), de sorte que

$$r_0 = \frac{u}{\pi} \dots \dots \dots \text{(VII.14)}$$

Où :

- r_0 = Rayon du drain (m).
- u = Périmètre mouillé (m).

Pour le fossé à ciel ouvert, le rayon équivalent (r_0) peut être calculé en substituant le périmètre mouillé du drain ouvert pour u dans l'équation VII.14. Pour le tuyau de drainage déposé dans des tranchées, le périmètre mouillé est prise comme :

$$u = b + 2r_0 \dots \dots \dots \text{(8.15)}$$

Où :

- b = Largeur du fossé (m)

Si un matériau d'enveloppe est utilisé à travers le tuyau de vidange (Figure 8.5), l'équation VII.15 change

$$u = b + 2(2r_0 + m) \dots \dots \dots \text{(8.16)}$$

Où :

- m = Hauteur de l'enveloppe au-dessus du drain (m)

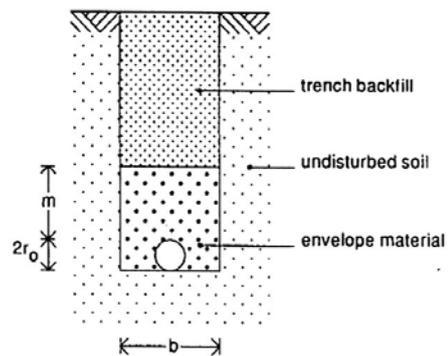


Figure 8.5 Drain pipe with gravel envelope in drain trench

La deuxième prétention (aucune résistance d'entrée) signifie que nous assumons un drain idéal. C'est correct tant que la conductivité hydraulique du fossé du drain est au moins 10 fois plus haute que celle du sol non remanié en dehors du fossé (SMEDEMA et RYCROFT 1983). Si la conductivité hydraulique est moins, un matériel d'enveloppe peut être employé pour diminuer la résistance d'entrée, de sorte qu'une plupart de la charge hydraulique soit disponible pour le traverser. S'il n'est pas possible d'employer un matériel d'enveloppe, la résistance d'entrée devrait être présentée dans les équations en remplaçant h par $(h - h_e)$, tel que h_e , est la perte principale d'entrée en mètres.

VII.4- L'équation De 'ERNST :

Jusqu'ici, nous avons seulement discuté des solutions qui peuvent être appliqués pour un profil sol homogène, ou pour un profil à deux couches sous la condition que l'interface entre les deux couches coïncide avec le niveau du drainage. L'équation de Ernst est applicable à tout type de profil de deux couches. L'avantage sur l'équation Hooghoudt que l'interface entre les deux couches peuvent être supérieures ou inférieures au niveau drain. Il est particulièrement utile lorsque la couche supérieure à une conductivité hydraulique nettement inférieure que la couche inférieure. Pour obtenir une solution généralement applicable aux profils du sol constitué de couches avec différentes conductivités hydrauliques, Ernst (1956; 1962) divise le débit à drainer a une verticale, une horizontale et une composante radiale (figure 8.6). Par conséquent, la charge totale disponible (h) peut être divisée en une perte de charge provoquée par l'écoulement vertical (h_v), l'écoulement horizontal (h_h), et le écoulement radial (h_r)

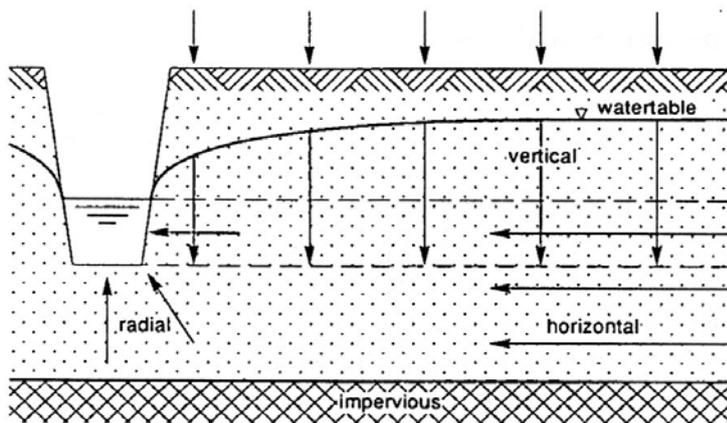


Figure 8.6 Geometry of two-dimensional flow towards drains. according to Ernst

VII.4.1-Écoulement vertical :

L'écoulement vertical est censé avoir lieu dans la couche entre la nappe phréatique et le niveau du drain (Figure 8.6). Nous pouvons obtenir la perte de charge provoquée par cet écoulement vertical en appliquant la loi de Darcy.

$$q = k_v \frac{h_v}{D_v}$$

Où :

$$h_v = q \frac{D_v}{k_v} \dots \dots \dots (\text{VII.18})$$

Avec :

- D_v : Épaisseur de la couche dans laquelle l'écoulement vertical est considéré (m).
- k_v : Conductivité hydraulique verticale (m / j).

Comme la conductivité hydraulique verticale est difficile à mesurer sur le terrain, elle est souvent remplacée par la conductivité hydraulique horizontale, ce qui est plutôt facile à mesurer avec la méthode trous à la tarière. En principe, ce n'est pas correct, surtout dans les sols alluviaux, où de grandes différences entre les conductivités horizontale et verticale peuvent se produire. La perte de charge verticale, cependant, est généralement faible par rapport à des pertes de charge horizontale et radiale, donc l'erreur introduite par K_v , remplacée pour K_h peut être négligée.

VII.4.2- Écoulement horizontal

L'écoulement horizontal est supposé avoir lieu en dessous du niveau de draine (Figure 8.6). Analogue à l'équation VII.6 la perte principale horizontale h_h , peut être décrit par

$$h_h = q \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h} \dots \dots \dots (\text{VII.19})$$

Où :

$\sum (KD)_h$ = Transmissivité spécifique des couches du sol à travers lequel l'eau circule horizontalement (m^2 / j)

Si la couche imperméable est très profonde, la valeur de $\sum (KD)_h$ tend vers l'infini et par conséquent la perte de charge horizontale diminue à zéro. Pour éviter cela, l'épaisseur maximale de la couche du sol au-dessous du niveau du drain par lequel l'écoulement est considéré comme $\sum (KD)_h$ est limitée à $\frac{1}{4} L$

VII.4.3- Écoulement radial :

L'écoulement radial est aussi supposé avoir lieu en dessous du niveau du drain (Figure 8.6). La perte de charge provoquée par l'écoulement radial peut être exprimée comme

$$h_r = q \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{aD_r}{u} \dots\dots\dots(\text{VII.20})$$

Ou :

- K_r = Conductivité hydraulique radiale (m / j).
- a = Facteur de la géométrie de la résistance radiale.
- D_r = Épaisseur de la couche dans laquelle l'écoulement radial est considéré(m).
- u =Périmètre mouillé du drain (m).

Cette équation a la même restriction pour la profondeur de la couche imperméable que l'équation pour un écoulement horizontal (i.e. $D_r < 4L$).

Le facteur de la géométrie (a) dépend du profil du sol et de la position de drain. Dans un profil de sol homogène, le facteur géométrique est égal à un, dans un sol en couches, le facteur de la géométrie dépend de savoir si les drains sont dans la couche supérieure ou inférieure du sol. Si les drains sont dans la couche inférieure, l'écoulement radial est supposé être restreint à cette couche, et encore $a = 1$. Si les drains sont dans la couche supérieure, la valeur de a dépend du rapport de la conductivité hydraulique du fond (K_b) et supérieure (K_t). En utilisant la méthode de relaxation, Ernst (1962) distingue les situations suivantes:

- $\frac{k_b}{k_t} < 0.1$ La couche de fond peut être considérée comme imperméable si le cas

de profil du sol homogène et $a = 1$.

- $0.1 < \frac{k_b}{k_t} < 50$: Le facteur a en fonctions de rapport $\frac{k_b}{k_t}$ que est donné dans le tableau 8.2.
- $\frac{k_b}{k_t} > 50$: $a = 4$.

Les expressions, respectivement, l'écoulement vertical (équation 8.18), l'écoulement horizontal (équation 8.19), et l'écoulement radial (équation 8.20) peuvent maintenant être remplacées dans l'équation 8.17.

$$h = q \frac{D_v}{k_v} + q \frac{L^2}{8 \sum(KD)_h} + q \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{aD_r}{u}$$

Où :

$$h = q \left(\frac{D_v}{k_v} + \frac{L^2}{8 \Sigma(KD)_h} + \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{aD_r}{u} \right) \dots \dots \dots (\text{VII.21})$$

Cette équation est généralement connue comme l'équation de Ernst. Si le taux de décharge de conception (q) et la disposition totale de la nappe phréatique (h) sont connus, cette équation quadratique pour l'espacement(L) peut être résolue directement.

Table 8.2 The geometry factor (a) obtained by the relaxation method (after Van Beers 1979)

$\frac{K_b}{K_t}$	$\frac{D_b}{D_t}$					
	1	2	4	8	16	32
1	2.0	3.0	5.0	9.0	15.0	30.0
2	2.4	3.2	4.6	6.2	8.0	10.0
3	2.6	3.3	4.5	5.5	6.8	8.0
5	2.8	3.5	4.4	4.8	5.6	6.2
10	3.2	3.6	4.2	4.5	4.8	5.0
20	3.6	3.7	4.0	4.2	4.4	4.6
50	3.8	4.0	4.0	4.0	4.2	4.6

Source : drainage principale

VII.4.4. Discussion sur l'état d'équilibre des équations :

Il devrait être clair à partir des sections précédentes que, lorsque nous sélectionnons les plus appropriées état stable équation, deux facteurs importants sont à considérer le profil du sol et la position relative des drains dans ce profil .Dans cette section, nous allons discuter de certaines des situations de terrain plus fréquents et sélectionne l'équation appropriée pour chacun d'eux. Les résultats sont résumés dans la figure VIII.7. Dans tous les cas, la limite inférieure est formée par une couche imperméable.

VII.4.4.1- Sol homogène :

Pour un sol homogène, la position du drain détermine quelle équation devrait être employée :

- Si les drains sont placés au-dessus de la couche imperméable, on peut utiliser l'équation VII.3 pour calculer l'espacement du drain.

- Si les drains sont dans la région au-dessus du plancher imperméable, nous pouvons employer HOOGHOUTD et la profondeur équivalente (équation VII.8), ou Ernst (équation VII.21). Ce dernier a la restriction que la profondeur du plancher imperméable ne devrait pas dépasser le 1/4 L. Pour des planchers imperméables plus profonds, les espacements calculés avec l'équation d'Ernst sont généralement trop petits. Puisque l'espacement du drain n'est pas connu à l'avance, cette condition doit être vérifiée après. Pour ce type de profil du sol, l'équation d'Ernst donne approximativement le même résultat que l'équation de HOOGHOUTD. Nous recommandons donc l'utilisation de l'équation de HOOGHOUTD parce qu'alors nous n'avons pas la restriction détaillée

SCHEMATIZATION	SOIL PROFILE	POSITION OF DRAIN	THEORY	EQUATION
	homogeneous	on top of impervious layer	Hooghoudt/Donnan	$q = \frac{4K(H^2 - D^2)}{L^2}$
	homogeneous	above impervious layer	Hooghoudt with equivalent depth	$q = \frac{8Kdh + 4Kh^2}{L^2}$
	two layers	at interface of the two soil layers	Hooghoudt	$q = \frac{8K_bdh + 4K_1h^2}{L^2}$
	two layers (K1 < Kb)	in bottom layer	Ernst	$h = q \left(\frac{D_v}{K_1} + \frac{L^2}{8K_bD_b} + \frac{L}{\pi K_b} \ln \frac{D_r}{u} \right)$
	two layers (K1 < Kb)	in top layer	Ernst	$h = q \left(\frac{D_v}{K_1} + \frac{L^2}{8(K_bD_b + K_1D_1)} + \frac{L}{\pi K_1} \ln \frac{aD_r}{u} \right)$

Figure 8.7 Summary of the steady-state equations

VII.4.4.2- Profil des sols à deux couches :

Pour un profil de sol à deux couches, nous pouvons distinguer trois situations, selon la position des drains :

- 1) Les drains sont à l'interface de la deuxième couche.
- 2) les drains sont dans la couche inférieure du sol.
- 3) Les drains sont dans la couche supérieure du sol.

Si les drains sont situés dans l'interface des deux couches (situation 1), nous pouvons utiliser l'équation HOOGHOUTT (équation VII.7), ce qui différencie la conductivité hydraulique au-dessus et au-dessous de niveau de drain.

Si les drains sont situés soit au-dessus ou au-dessous de l'interface des couches des deux sols (situation 2 ou 3), la conductivité hydraulique ne peut pas être différenciée de la même manière et que nous avons pour demander Ernst (équation 8.21). Si, toutefois, la couche inférieure des bas une conductivité hydraulique nettement inférieure que la couche supérieure, nous pouvons considérer que la couche inférieure imperméable et simplifier le problème à un profil reposant sur une couche imperméable. Dans ce cas, nous pouvons appliquer HOOGHOUTT sans introduire des erreurs importantes. Ainsi l'équation de Ernst est principalement utilisé pour un profil à deux couches de sol, lorsque la couche supérieure conductivité hydraulique que la couche inférieure ($K_t < K_b$).

Si les drains sont situés dans la couche inférieure du sol (situation 2 et la figure 8.8A), nous pouvons faire les simplifications suivantes:

- Nous ne pouvons négliger la résistance verticale dans la couche inférieure par rapport à la résistance verticale dans la couche supérieure, car la conductivité hydraulique dans la couche inférieure est plus élevée que dans la couche supérieure;
- Nous pouvons pas négliger la transmissivité de la couche supérieure, parce que $K_t < K_b$, et en général aussi $D_t < D_b$. Ainsi dans l'équation VII.19, $\sum(KD)_h$, peut être remplacé par $K_b D_b$
- L'écoulement radial est limité à la couche en dessous du niveau de vidange (D_r), et donc $a = 1$.

Par conséquent l'équation 8,21 est réduite à :

$$h = q \left(\frac{D_v}{k_v} + \frac{L^2}{8 \sum(KD)_h} + \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{D_r}{u} \right) \dots \dots \dots (\text{VII.22})$$

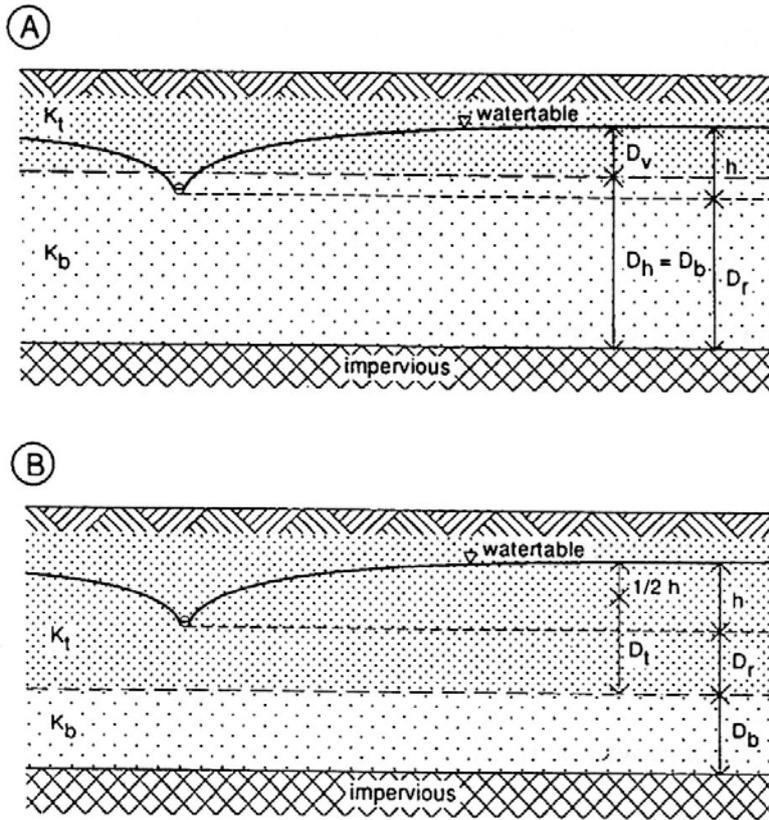


Figure 8.8 Geometry of the Ernst Equation for a two-layered soil with the drain in the bottom layer (A) and in the top layer (B)

Si les drains sont situés dans la couche supérieure (situation 3 et la figure 8,8 G):

- Il n'y a pas d'écoulement vertical dans la couche inférieure, de sorte $D_v = h$.
- Lorsqu'on considère l'écoulement horizontal, cependant, nous ne pouvons pas négliger la transmissivité de la couche supérieure, et $\sum(KD)_h = k_b \cdot D_b + k_t \cdot D_t$ dans laquelle $D_t = D_r + (1/2)h$
- L'écoulement radial est limité à la région dans la couche supérieure du sol

dessous du niveau de vidange et le facteur de géométrie dépend du rapport de la conductivité hydraulique des couches supérieure et inférieure, comme cela a été discuté à la section VII.2.2.

Dans ce cas, l'équation VII.21 peut être réduite à :

$$h = q \left(\frac{D_v}{k_v} + \frac{L^2}{8 \sum(KD)_h} + \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{a D_r}{u} \right) \dots \dots \dots (\text{VII.23})$$

VII.5- L'équation GLOVER-DUMM :

Dans le cas du régime variable (ou transitoire), le débit n'est pas constant, mais varie avec le temps. Le changement du stockage reflète une augmentation ou une diminution de la nappe phréatique. Encore une fois l'approche de DUPUIT-FORCHHEIMER peut être utilisée pour montrer une équation différentielle du régime transitoire, nous considérons une colonne L de sol qui est délimitée par la nappe phréatique dans le haut et par une couche imperméable au fond. S'il n'y a pas de recharge de la nappe phréatique ou de changement de stockage e le profil de sol comme représenté ci-après (figure 8.12):

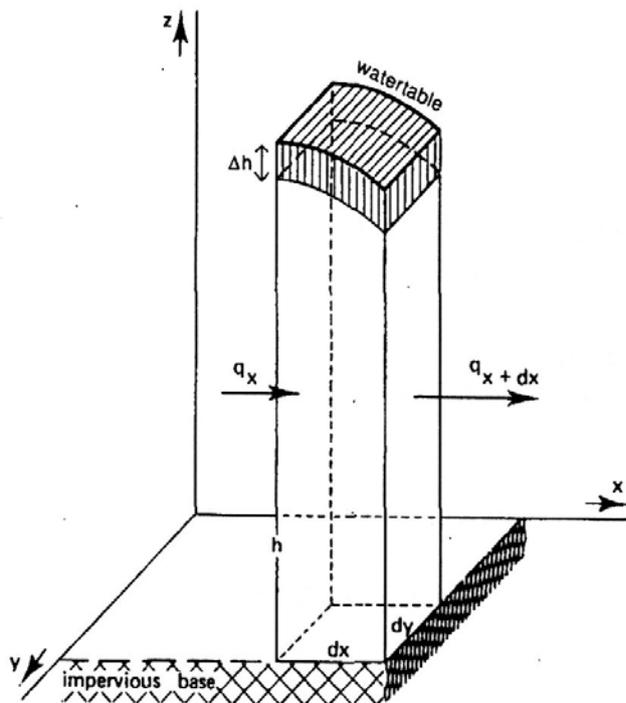


Figure 8.12 Change in storage in a soil column under a falling watertable

$$\Delta w = \mu \Delta h dx dy \dots \dots \text{(VII.24)}$$

Ou :

- Δw : changement destockage d'eau par unité de surface au cours du temps considéré (m)
- μ : Espace des pores (porosité efficace)
- Δh : changement dans le niveau de la nappe phréatique sur le temps considéré (m)

Le changement dans le stockage sur une période considérée comme infiniment petite du temps, dt, est ;

$$dW = \mu \frac{\partial h}{\partial t} dx dy \dots \dots \dots \text{(VII.25)}$$

Le principe de continuité exige maintenant que la différence totale des écoulements sortants moins entrants dans x et y. directions est égale à la variation de stockage. D'où l'équation de continuité peut être écrite comme :

$$-K \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] dx dy = \mu \frac{\partial h}{\partial t} dx dy \dots \dots \dots \text{(VII.26)}$$

Nous pouvons simplifier cette équation en considérant que h sera grande par rapport aux changements de h; afin que nous puissions prendre h comme une constante D. étant l'épaisseur moyenne de la couche d'eau de transmission. Par ailleurs, comme nous considérons les écoulements dans une direction, l'équation VII.26 donne l'équation différentielle suivante pour l'écoulement transitoire :

$$KD \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \dots \dots \dots \text{(VII.27)}$$

DUMM (1954) a utilisé cette équation différentielle pour décrire la chute de la nappe phréatique après avoir augmenté instantanément à une hauteur au-dessus du niveau du drain (Figure 8.13). Sa solution, qui est basée sur une formule développée par Glover, décrit la descente d'une nappe initialement horizontale en fonction du temps, du lieu, de l'espacement du drain, et des propriétés du sol.

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\alpha t n^2} \sin \frac{n\pi x}{L} \dots \dots \dots \text{(VII.28)}$$

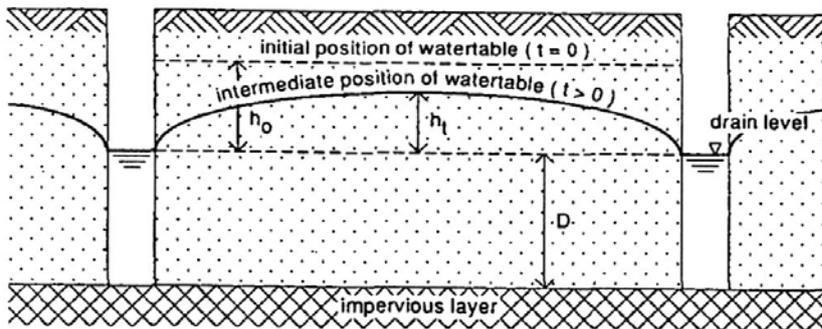


Figure 8.13 Boundary conditions for the Glover-Dumm equation with an initially horizontal watertable

Source : Drainage principal.

Où :

$$\alpha = \frac{\pi^2 kd}{\mu L^2} \dots \dots \dots \text{(VII.29)}$$

Où:

- $h(x, t)$ = Hauteur de la nappe phréatique à une distance x au temps t (m).
- h_0 = Hauteur initiale de la nappe phréatique à l'instant $t=0$ (m).
- α = Facteur de réaction (j^{-1}).
- K = Conductivité hydraulique (m / j).
- d = Profondeur équivalente de la couche de sol au-dessous du niveau de draine (m).
- μ = Espace des pores (porosité efficace).
- L = Espacement du draine (m).
- t = Temps après l'élévation instantanée de la nappe phréatique (j).

Nous pouvons trouver la hauteur de la nappe phréatique à mi-distance entre les drains en changeant la valeur de x par $(1/2).L$ dans l'équation VII.28

$$h_t = h\left(x = \frac{1}{2}L\right) = \frac{4}{\pi} h_0 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\alpha t n^2} \dots\dots\dots(\text{VII.30})$$

Ou :

h_t : hauteur de la nappe phréatique à mi-distance entre les drains à $t > 0$ (m)

- Si $\alpha t > 0,2$, le deuxième et tous les termes qui suivent de l'équation 8.30 sont petits et peuvent être négligés. Donc cette équation se réduit à

$$h_t = \frac{4}{\pi} h_0 e^{-\alpha t} = 1,27. h_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(\text{VII.31})$$

Si, au lieu d'être horizontale, la nappe initiale à la forme d'une parabole de quatrième degré, l'équation 8,31 devient (Dumm 1960)

$$h_t = 1,16. h_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(\text{VIII.32})$$

En remplaçant l'équation VII.29 dans l'équation VII.32, on trouve une expression pour l'espacement de drain

$$L = \pi \left(\frac{Kdt}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}. (\ln 1.16 \frac{h_0}{h_t})^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(\text{VII.33})$$

Qui est appelée l'équation de GLOVER-DUMM.

Le débit de drainage à tout moment, t , exprimée par unité de surface, peut être calculé à partir de loi de Darcy

$$q_t = -\frac{2Kd}{L} \left[\frac{dh_t}{dx}\right]_{x=0} \dots\dots\dots(\text{VII.34})$$

q_t : Débit du drainage par unité de surface à $t > 70$ (m / j).

Différencier l'équation VII.28 par rapport à x, négligeant les termes n > 1, en substituant x=0, et en combinant avec l'équation 8.34 donne :

$$q_t = \frac{8kd}{L^2} \cdot h_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(\text{VII.35})$$

On remplace dans l'équation 8.31, on obtient :

$$q_t = \frac{2\pi kd}{L^2} \cdot h_t \dots\dots\dots \text{VII.36}$$

Ceci est similaire à l'équation décrivant l'écoulement HOOGHOUTD au-dessous du niveau du draine (équation 8.6), sauf que le facteur 8 est maintenant remplacé par 2π . Note: Pour le degré près 2π devient 6,89. Il peut être vu que le débit du drainage, q "est directement liée à la profondeur de la nappe phréatique, h_t . Ceci est important lorsque les données d'un champ expérimental sont en cours d'analyse (par exemple pour le facteur de réaction α). L'équation originale de GLOVER-DUMM est basée sur les écoulements horizontaux et ne prend pas en compte la résistance radiale de l'écoulement vers les drains qui n'atteint pas la couche imperméable. .

Chapitre VIII:

PROGRAMMATION

VIII.1- Introduction :

Pour la réalisation d'un programme du calcul du dimensionnement des réseaux du drainage, on a choisi le langage de programmation Visual basic 6.4 qui est associé avec le programme de **Microsoft Excel**.

Ces choix n'étaient pas pris au hasard mais vu la large utilisation de **Microsoft Excel** par nous étudiants et sachant que presque toutes les données fournies par l'ANRH sont sous forme de fichier Excel, c'est d'une part et d'autre part, ce choix répond parfaitement aux exigences du processus de calculs envisagés et il offre un environnement de travail très agréables.

Dans ce chapitre on essaiera de présenter les algorithmes et toutes les étapes jugées intéressantes pour donner une idée générale sur le mode du développement entrepris, pour la réalisation du produit final.

VIII.2 Composition du programme :

Le programme se compose d'un système de macros complémentaires et de fonctions.

Un fichier comporte la base des données indépendantes du logiciel permet de les mettre à jour facilement et de les corriger aussi si nécessaire.

VIII.3- NOTION D'ALGORITHME :

Du mathématicien persan Al-Khwa-Rizm (Bagdad, 780 – 850) pour les notions de AL-JABR (Algèbre) théorie du calcul.

Plus ancien : Euclide (3ème siècle avant JC).

Babyloniens (1800 avant JC)

Selon LAROUSSE, la définition d'algorithme est « Un ensemble de règles opératoires dont l'enchaînement permet de résoudre un problème au moyen d'un nombre fini d'opérations. ».

Quelques points importants :

- Un algorithme décrit un traitement sur un ensemble fini de données de nature simple (nombres ou caractères), ou plus complexes (données structurées)
- Un algorithme est constitué d'un ensemble fini d'actions composées d'opérations ou actions élémentaires. Ces actions élémentaires doivent être effectives (réalisables par la machine) et non ambiguës.
- Un algorithme doit toujours se terminer après un nombre fini d'opérations.
- L'expression d'un algorithme nécessite un langage clair (compréhension), structuré (enchaînements d'opérations), non ambigu et universel (indépendants du langage de programmation choisi).

Problème : un tel langage n'existe pas, on définit son propre langage.

VIII.3- MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION D’UN ALGORITHME :

Analyse descendante (ou programmations structurées) : On décompose un problème complexe en sous problèmes et ces sous problèmes en d’autres sous problèmes jusqu’à obtenir des problèmes faciles à résoudre c'est-à-dire connus.

On résout les sous problèmes simples sous forme d’algorithme puis on recompose les algorithmes pour obtenir l’algorithme global du problème du départ.[6]

VIII.4- Notion d’organigramme :

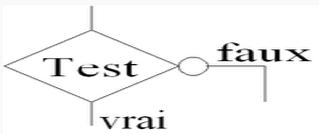
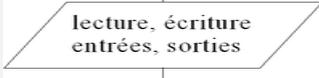
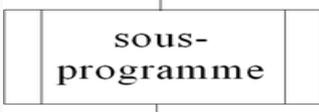
Un **organigramme de programmation** (parfois appelé **algorithme**, **logigramme** ou plus rarement **ordinogramme**) est une représentation graphique normalisée de l'enchaînement des opérations et des décisions effectuées par un programme d'ordinateur ou par un algorithme.[15]

VIII.5.1- Éléments constitutifs d’un organigramme :

Une norme ISO a été développée, elle porte le numéro ISO 5807. Elle décrit en détail les différents symboles à utiliser pour représenter un programme informatique de manière normalisée.

VIII.5.2-Symboles :

L'organigramme utilise des symboles normalisés représentés dans le tableau ci-dessous :

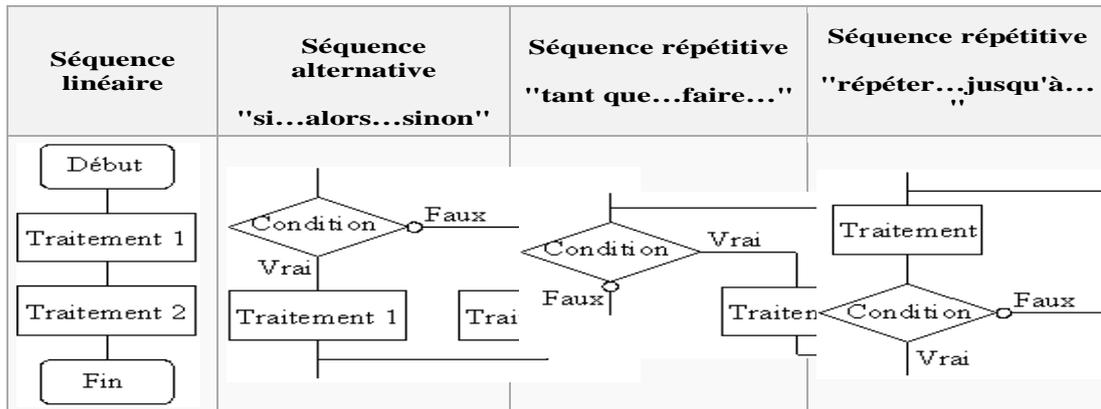
Symboles normalisés	Commentaires:
	<p>Les tests ou branchements conditionnels :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la pointe vers le haut est l'entrée du test. • la pointe sur le côté est le résultat du test lorsqu'il est faux, • la pointe vers le bas est le résultat du test lorsqu'il est vrai.
	<p>Mise à disposition d'une information à traiter ou enregistrement d'une information traitée.</p>
	<p>Appel de sous programme.</p>

Sens conventionnel des liaisons : Le sens général des lignes doit être de haut en bas et/ou de gauche à droite. Lorsque le sens ainsi défini n'est pas respecté, il est nécessaire de flécher.

VIII.5.3-Différentes structures :

La structure est le mode d'assemblage des éléments des structures.

Le tableau représente les différentes structures possibles : [23]



VIII.6- Organigramme du fonctionnement de notre logiciel :

Pour transformer une équation en organigramme, il faut d'abord déterminer les paramètres de cette équation et les conditions qui il faut respecter pour pouvoir faire le calcul.

Dans ce chapitre, on ne peut pas représenter toutes les formules qu'on a utilisé pour la conception de notre logiciel, mais on site seulement les plus importantes.

VIII.6-Définition d'un Vecteur :

Ensemble des données d'un même type présentées sous forme d'une suite des mots ou des chiffres tous séparés par le même incrément, en vue de leur traitement par un ordinateur vectoriel.

VIII.7- Programmation :

Avant aborder la programmation, on définira quelques fonctions telle que :

- Abs (x) : C'est la fonction donnant la valeur absolue de x.
- Sqr (x) : C'est la racine carré de x.
- Exp (x) : C'est l'exponentielle de $x = e^x$.
- 10^3 : C'est 10 à la puissance 3 = 1000.

VIII.7.1- Organigramme de détermination de la pluie de n jours :

Pour commencer le traitement statistique, il faut d'abord déterminer les pluies de :1j,2j,...,7j

Que-est-ce qu'une pluie de 1j, 2j,...,7j ?

Définition de la pluie de :

- 1 jour : C'est l'apport d'eau d'un seul jour sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.
- 2 jours : C'est l'apport d'eau de deux jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.

- 3 jours : C'est l'apport d'eau de trois jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.
- 4 jours : C'est l'apport d'eau de quatre jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.
- 5 jours : C'est l'apport d'eau de cinq jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.
- 6 jours : C'est l'apport d'eau de six jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.
- 7 jours : C'est l'apport d'eau de sept jours successifs sans que la pluie tombe dans le jour précédent ni succédant.

Pour transformer ces définitions en algorithme, il faut faire une série de tests permettant de détecter les valeurs successives et considérer les paramètres de définition.

Pour cette raison, on va définir un vecteur qui comprend toutes les valeurs d'entrée par l'utilisateur, on peut nommer ce vecteur (Vd).

Vd : Vecteur d'entrée ; **Vd(1 : n)** ; telle que :

- Vd(1) : C'est la première valeur du vecteur.
- Vd(n) : C'est la n^{ième} valeurs du vecteur.

Pour introduire les valeurs dans le vecteur qu'on a crié, une série d'itérations est indispensable comme la montre la **FIGURE VIII.1**:

Avec:

- V1j(i) : Vecteur du résultat du 1^{ier}jour.
- V2j(i) : Vecteur du résultat du 2^{eme}jour.
- V3j(i) : Vecteur du résultat du 3^{eme}jour.

Et ainsi de suite.

VIII.7.2- Organigramme d'ajustement de la loi normale :

Pour mieux comprendre cet organigramme, il faut bien lire le chapitre III, parce qu'il explique son fonctionnement.

On peut définir les vecteurs suivants de l'organigramme représenté par la figure VIII.2 :

- Vin(i) : Vecteur des valeurs initiales au départ du programme.
- Vtr(i) : Vecteur permettant de trier les valeurs par ordre croissant.
- Vfe(i) : Vecteur calculant la fréquence expérimentale.
- Vvr(i) : Vecteur comportant la variable réduite de Gauss.
- Moy : Valeur représentant la moyenne calculée.

- Vcar : Vecteur calculant les carrés des valeurs pour déterminer par la suite l'écart type.
- Variance : Valeur représentant la variance.
- Ecar : Valeur représentant l'écart type.
- Vth(i) : Vecteur contenant les valeurs théoriques calculées à partir de la droite de Hynrie.
- Inco : Valeur par laquelle on détermine l'intervalle de confiance.
- Unico : Valeur de la variable réduite correspondant à l'intervalle de confiance.
- Vbi(i) : Vecteur de la valeur calculée représentant la borne inférieure de l'intervalle de confiance.
- vbs(i) : Vecteur de la valeur calculée représentant la borne supérieure de l'intervalle de confiance.
- vcinf : Vecteur de valeur calculée représentant le test de la valeur expérimentale avec la borne inférieure.
- vcsup(i) : Vecteur de valeur calculée représente le test de la valeur expérimentale avec la borne supérieure.
- i;j : Ce sont des compteurs.

VIII.7.3- Organigramme d'ajustement de la loi log-normal :

Il a le même principe que l'organigramme précédant avec un petit changement au niveau des formules et en ajoutant un seul vecteur sous le nom de vti(j) qui remplace le vecteur vtr(i) alors que le vecteur vtr(i) est destiné à un autre calcul.

La figure VIII.3 présente l'organigramme de cette loi d'ajustement.

VIII.7.4- Organigramme d'ajustement de la loi de Gumbel:

Il a le même principe de fonctionnement de l'organigramme de la loi normale avec un petit changement au niveau des formules.

La Figure VIII.4 présent cet organigramme.

VIII.7.5- Autres organigramme :

Vue la simplicité relative des fonctions du drainage par rapport aux lois d'ajustement, on va représenter seulement les figures ayant une importance pour éviter la répétition dans l'application car notre programme se compose de tests logiques et simples.

Tableau VIII.1 associant chaque formule par sa graphique représentative.

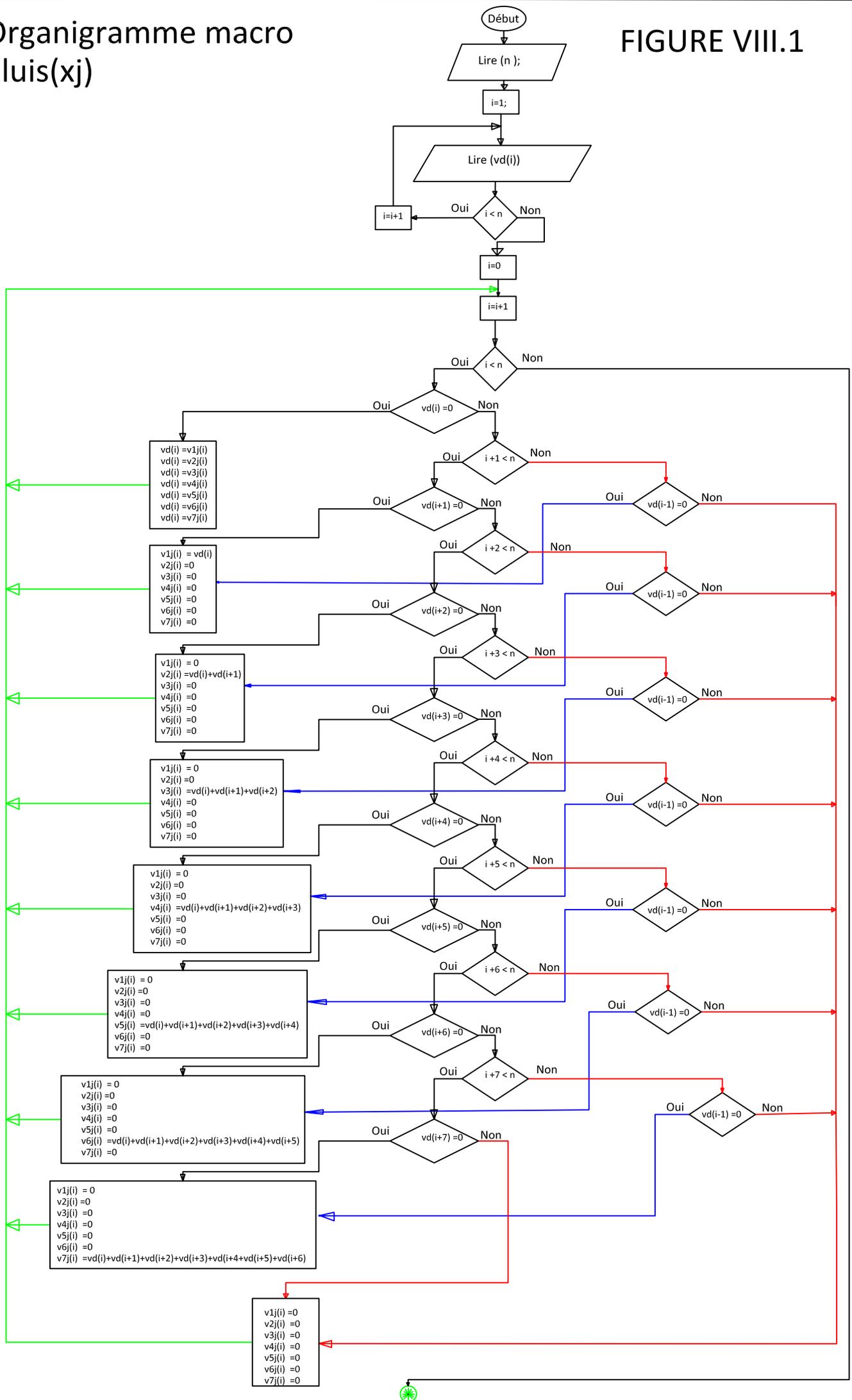
Le Tableau VIII.1: Tableau récapitulatif.

Régime d'écoulement	Auteur de formule	La formule	condition	Le graphique représentatif
Permanent	HOOGHOUDT	$q = \frac{8kDh + 4kh^2}{L^2}$	Drain reposant sur l'imperméable, sol homogène.	VIII.5
Permanent	HOOGHOUDT	$q = \frac{8kdh + 4kh^2}{L^2}$	Drain qui se trouvant au-dessus de l'imperméable, sol homogène.	VIII.6
Permanent	HOOGHOUDT	$q = \frac{8k_b Dh + 4k_t h^2}{L^2}$	Drain se trouvant de l'interface de deuxième horizon, sol à deux strates.	VIII.7
Permanent	ERNST	$h = q \left(\frac{D_v}{k_v} + \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h} + \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{D_r}{u} \right)$	Drain qui se trouvant au-dessus de l'imperméable, au niveau du 2 ^{ème} horizon ; sol à deux strates.	VIII.8
Permanent	ERNST	$h = q \left(\frac{D_v}{k_v} + \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h} + \frac{L}{\pi k_r} \ln \frac{aD_r}{u} \right)$	Drain se trouvant au-dessus de l'imperméable, au niveau du 1 ^{ème} horizon ; sol à deux strates.	VIII.9
transitoire	GLOVER-DUMM	$L = \pi \left(\frac{Kdt}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\ln 1.16 \frac{h_0}{h_t} \right)^{\frac{1}{2}}$	On le fait pour les deux cas (drain reposant sur l'imprimable au non).	VIII.10

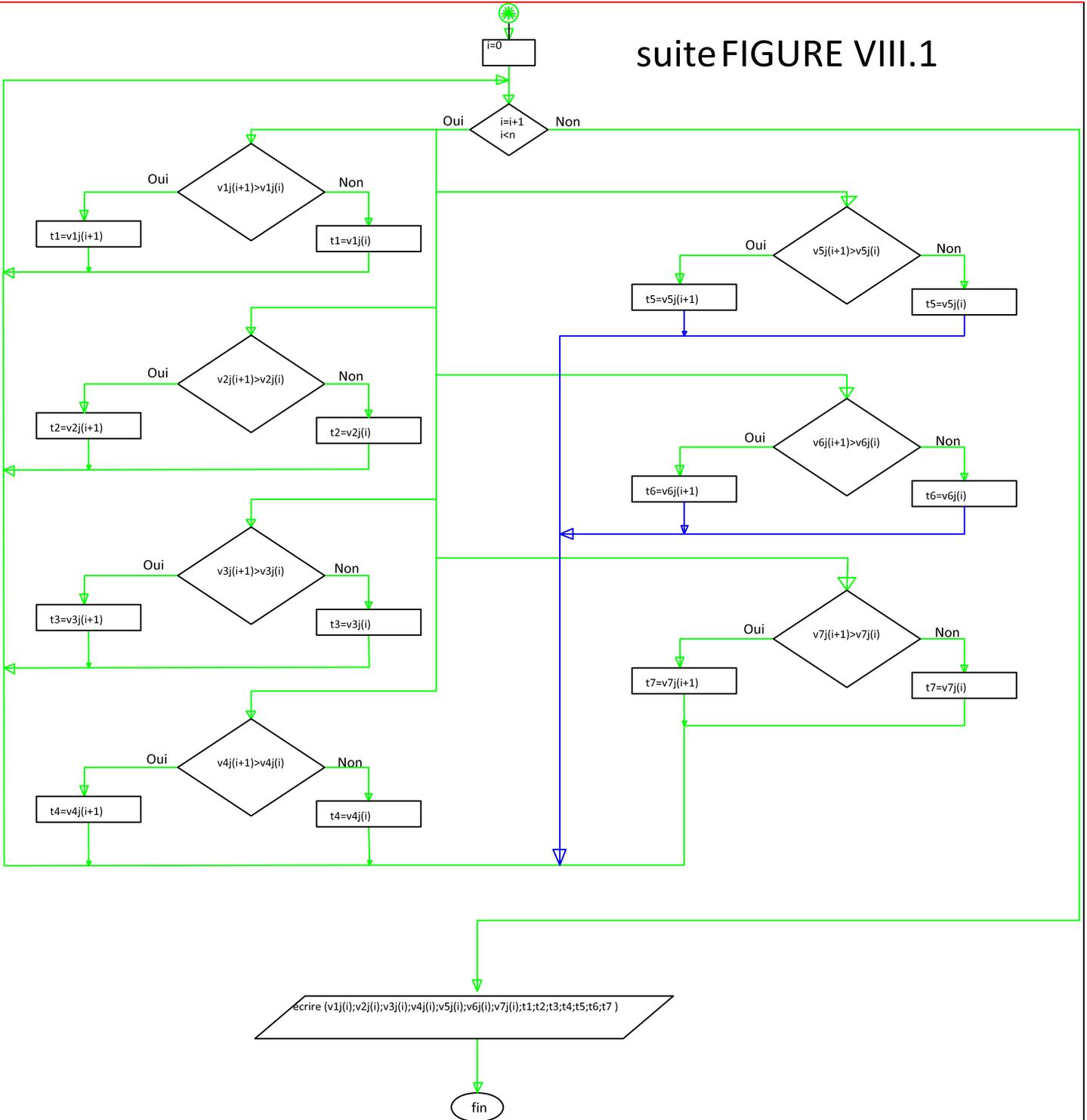
Les Algorithmes

Organigramme macro plus(xj)

FIGURE VIII.1

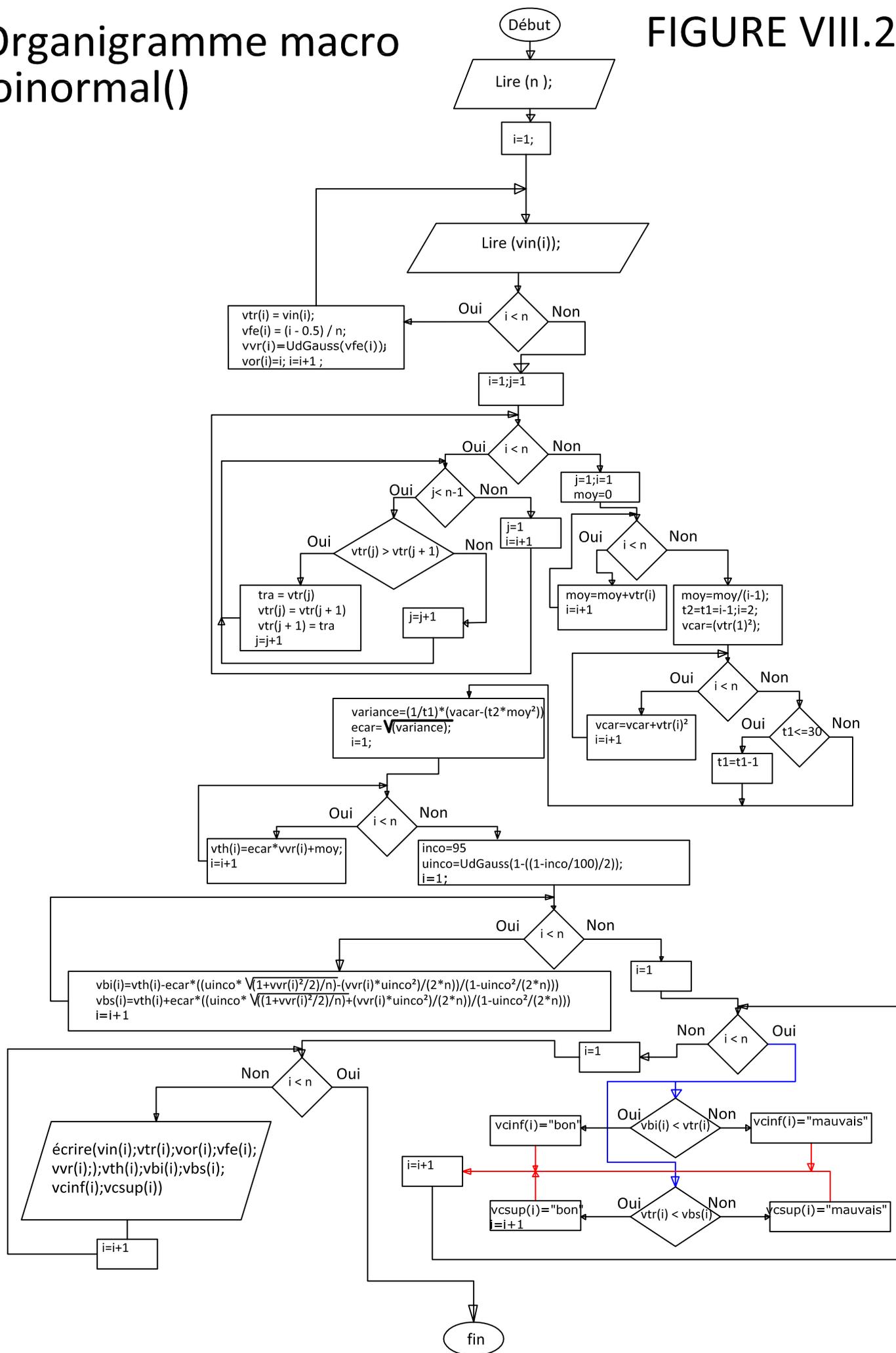


suiteFIGURE VIII.1



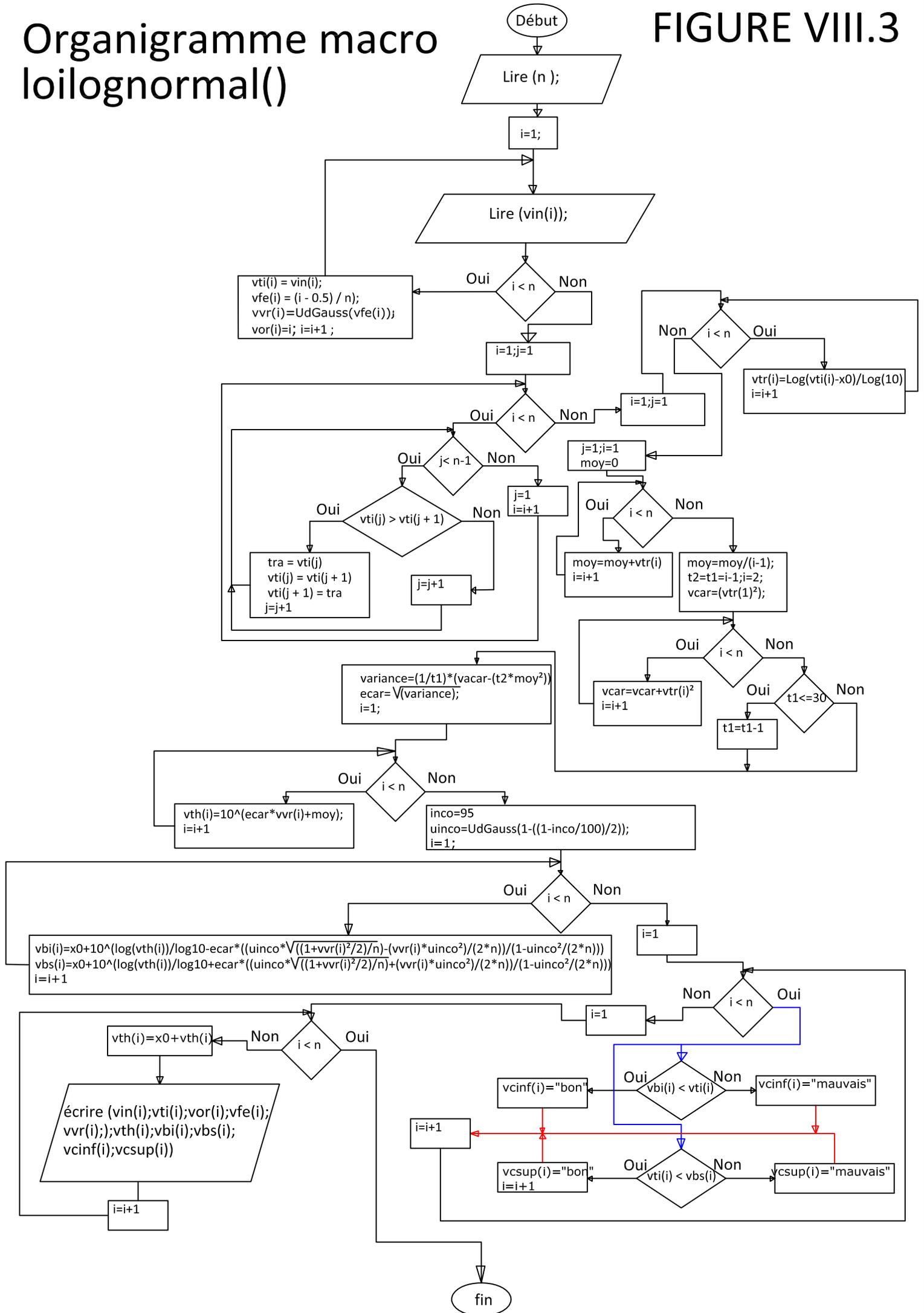
Organigramme macro loinormal()

FIGURE VIII.2



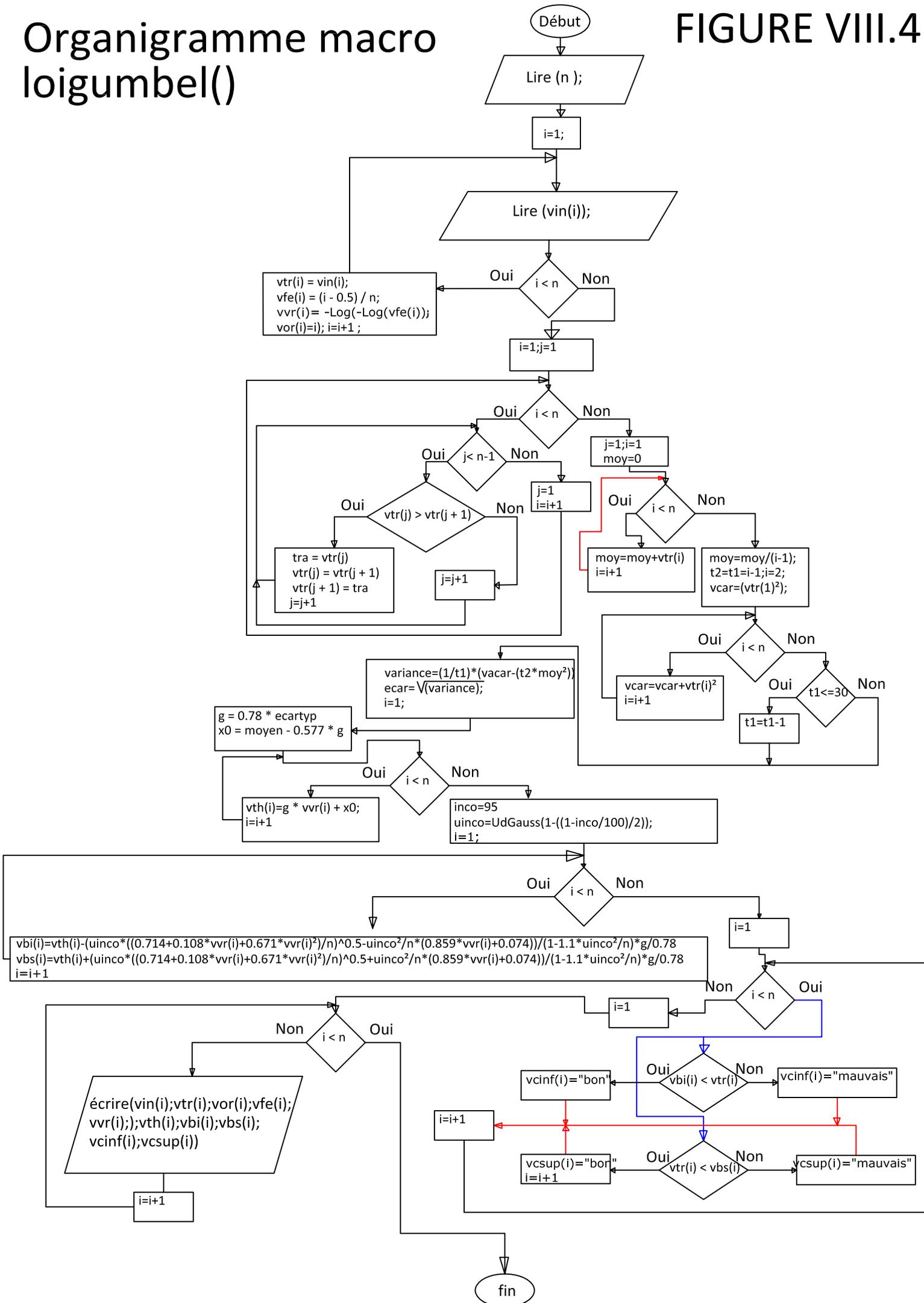
Organigramme macro loilognormal()

FIGURE VIII.3



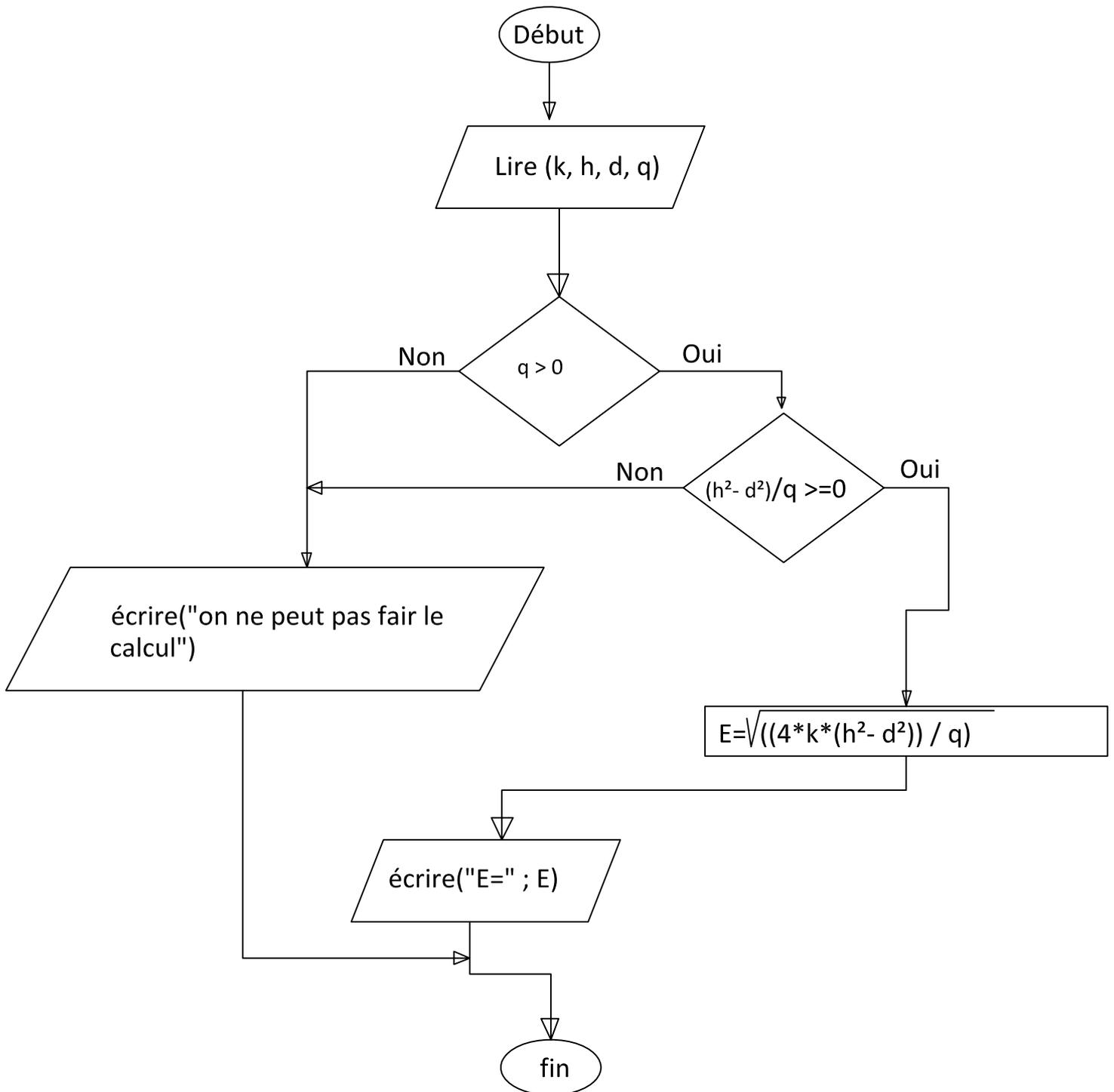
Organigramme macro loigumbel()

FIGURE VIII.4



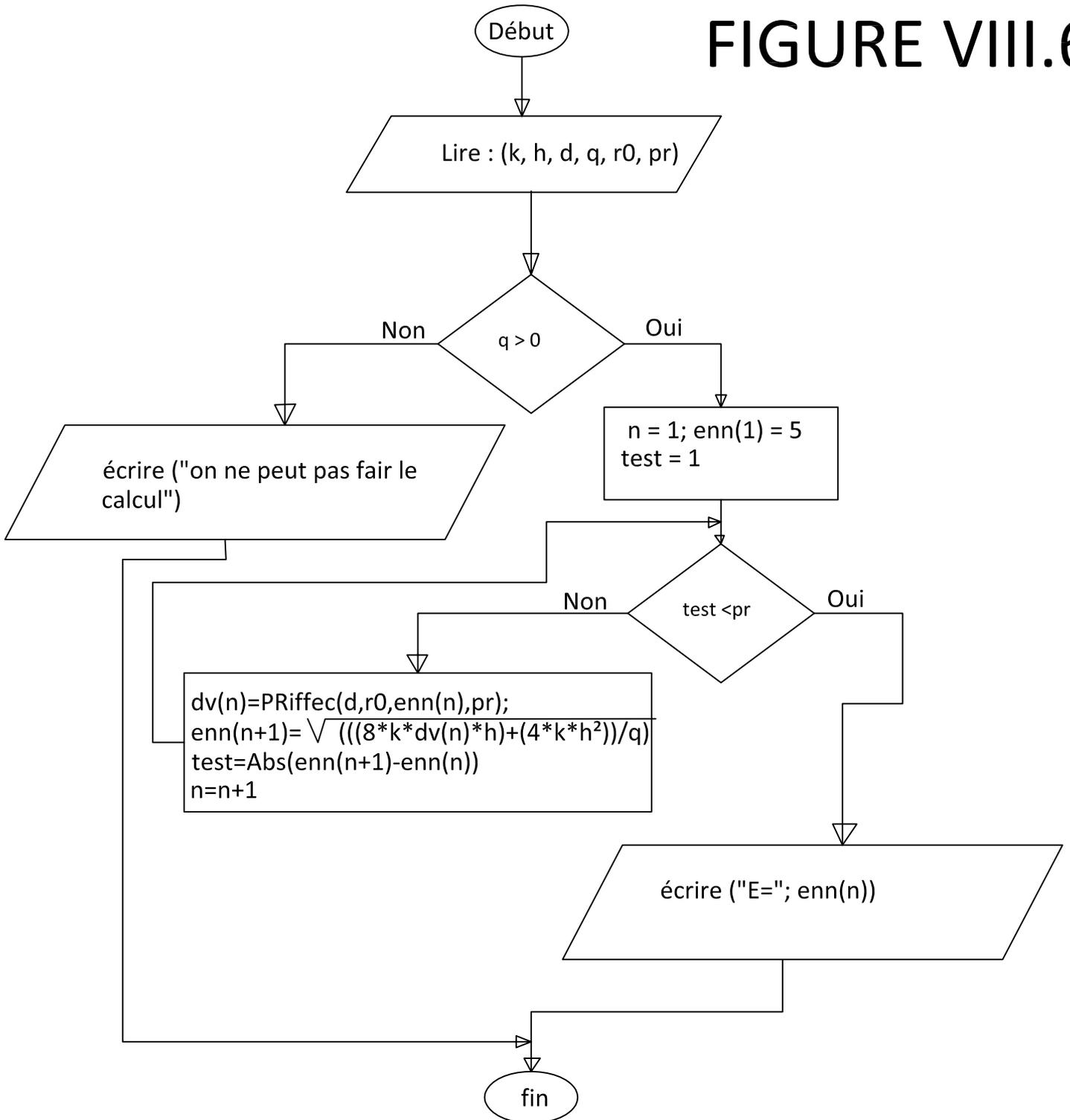
Organigramme Fonction
EHdrsish(k, h, d, q)

FIGURE VIII.5



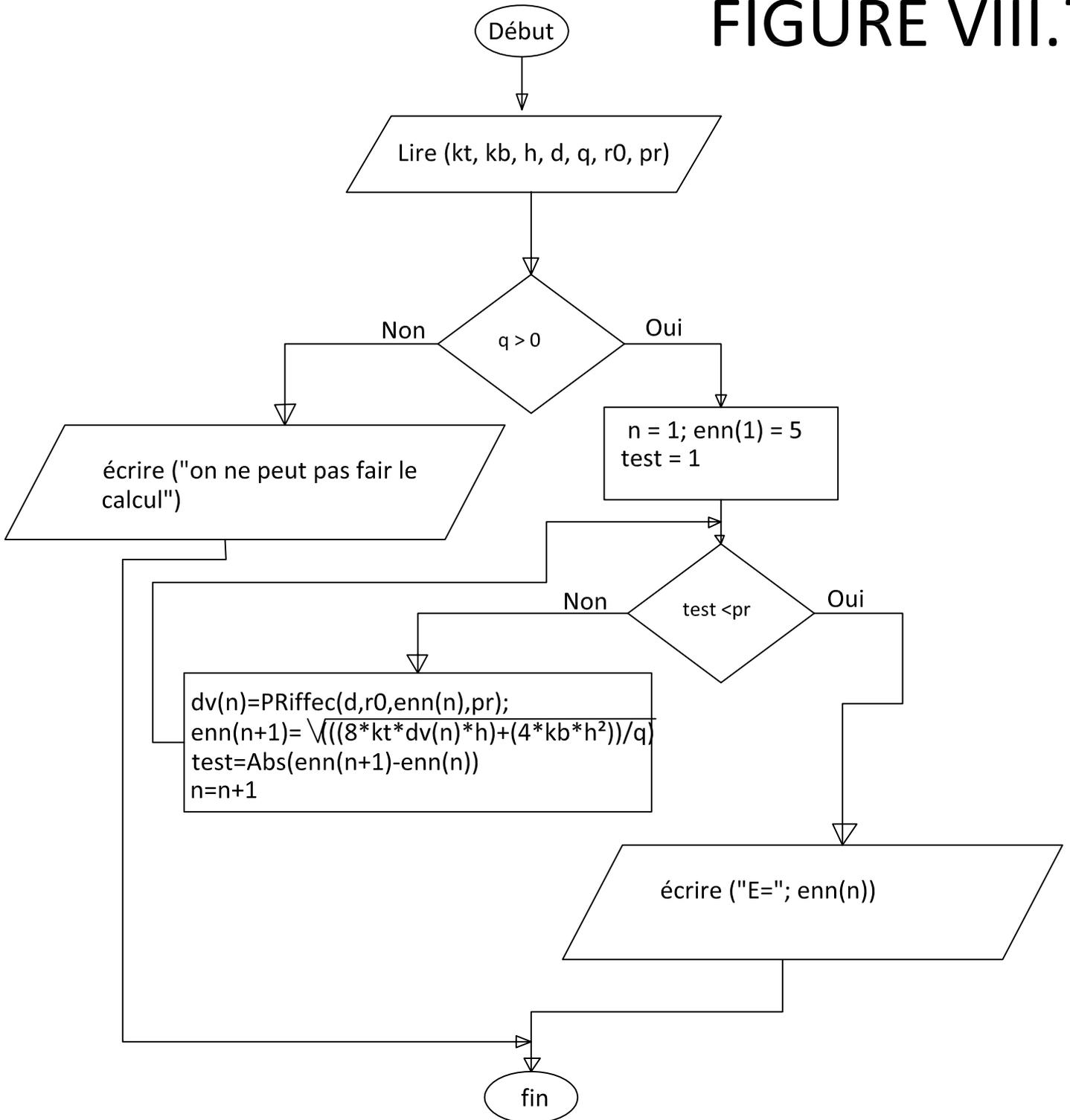
Organigramme Fonction
EHdraish(k, h, d, q, r0, pr)

FIGURE VIII.6



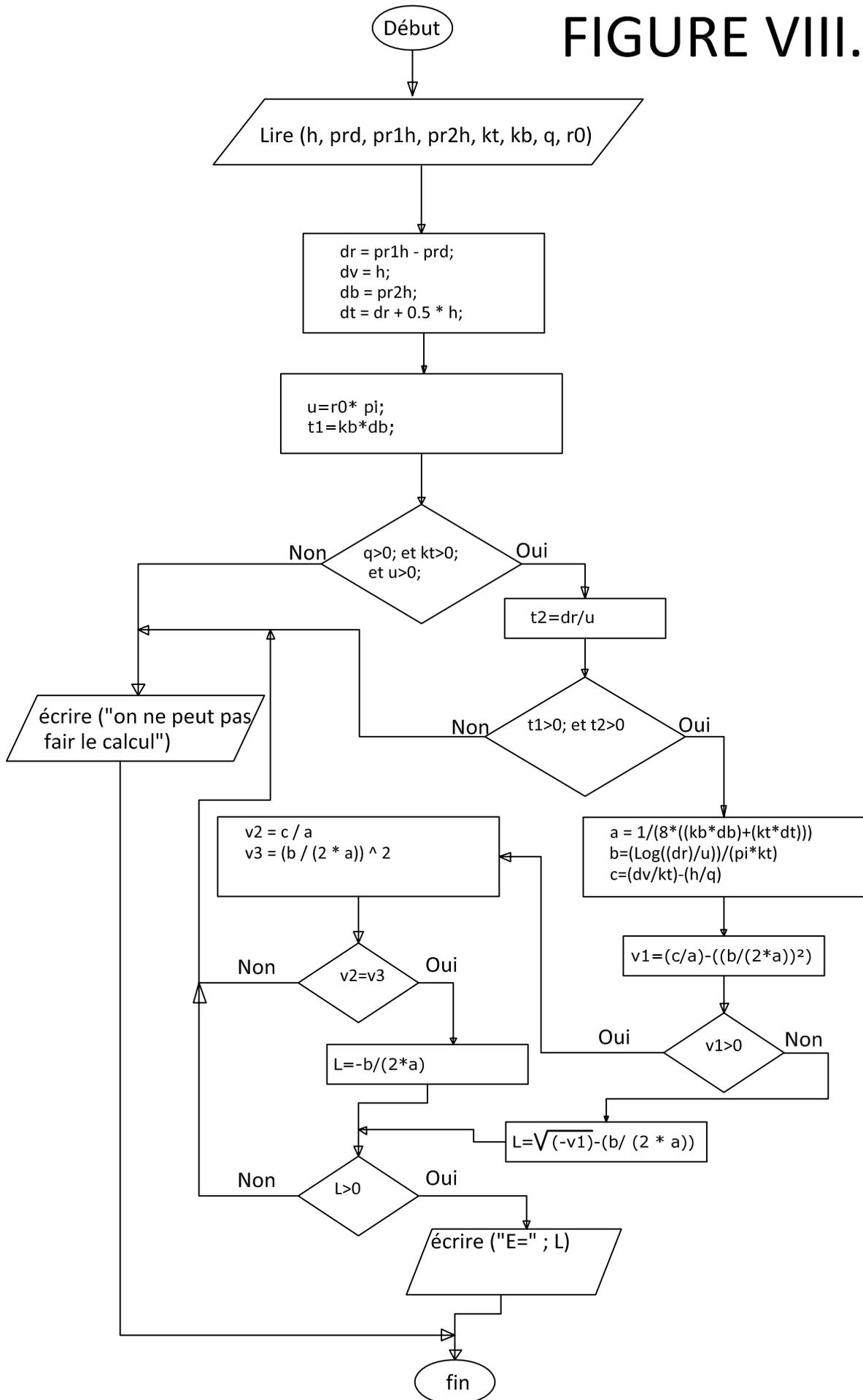
Organigramme Fonction
EHdraishn(kt, kb, h, d, q, r0, pr)

FIGURE VIII.7



Organigramme Function
 ernst1b(h, prd, pr1h, pr2h, kt, kb, q, r0)

FIGURE VIII.8



Organigramme Fonction
 ernst2t(h, prd, pr1h, pr2h, kt, kb, q, r0)

FIGURE VIII.9

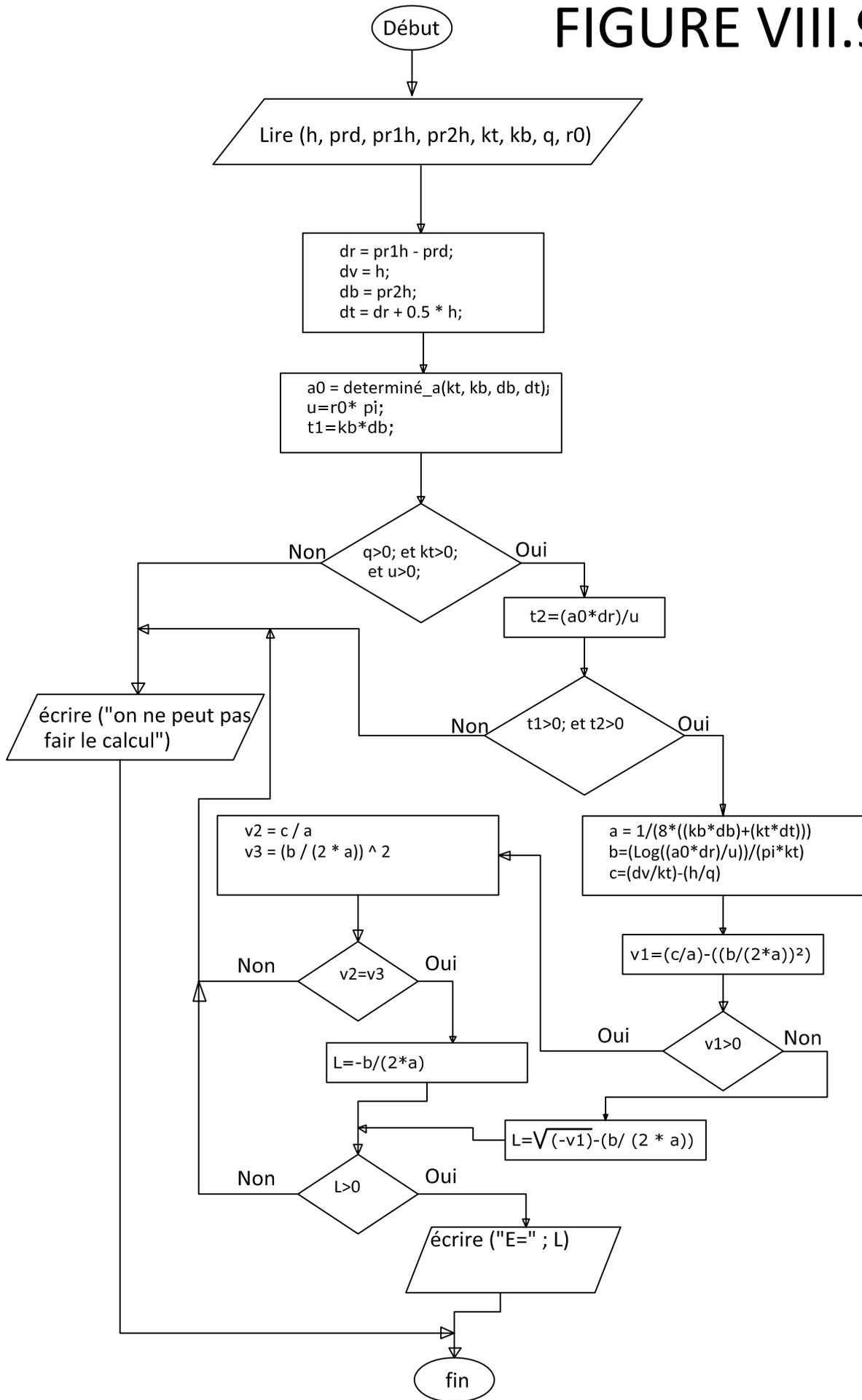
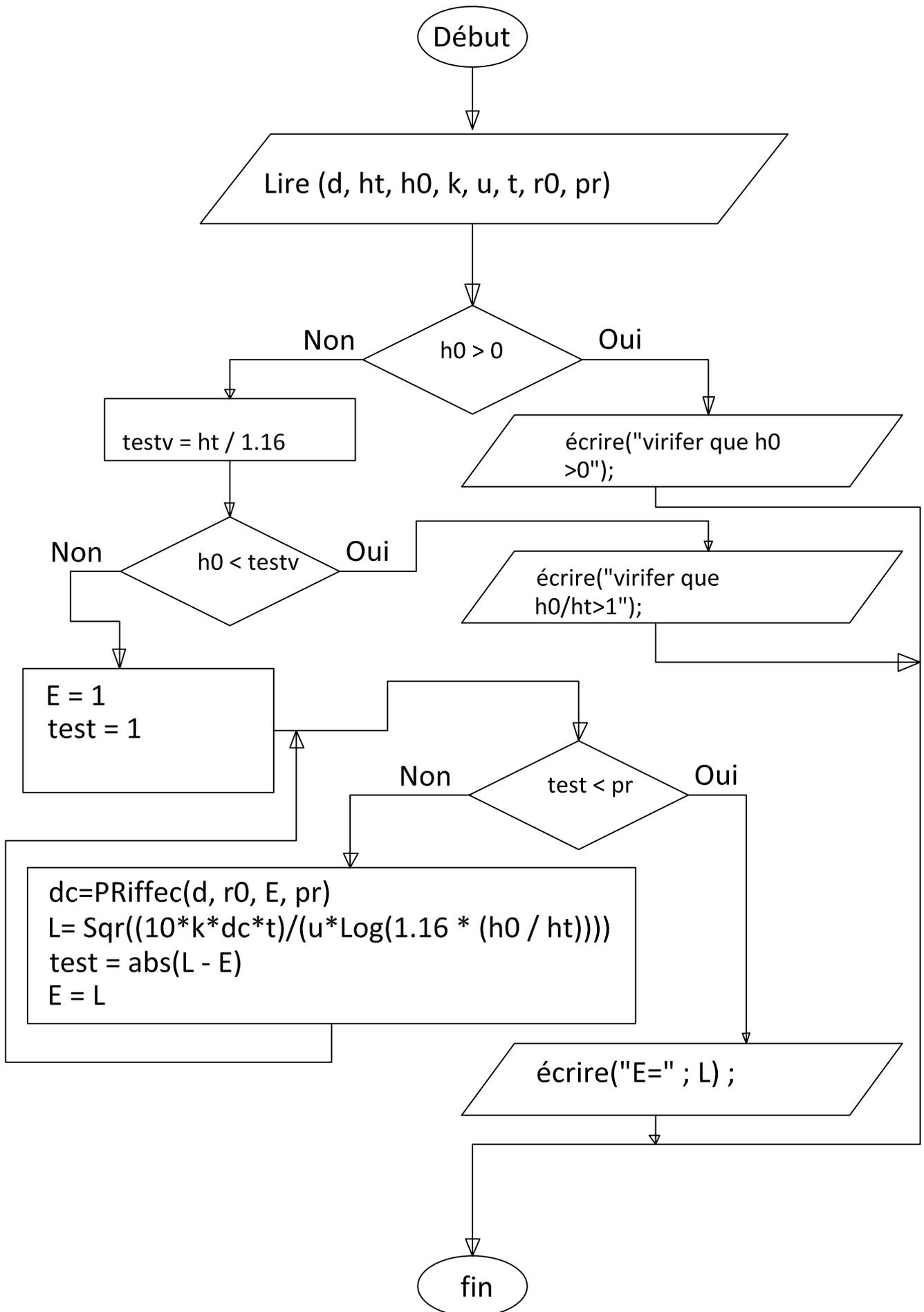
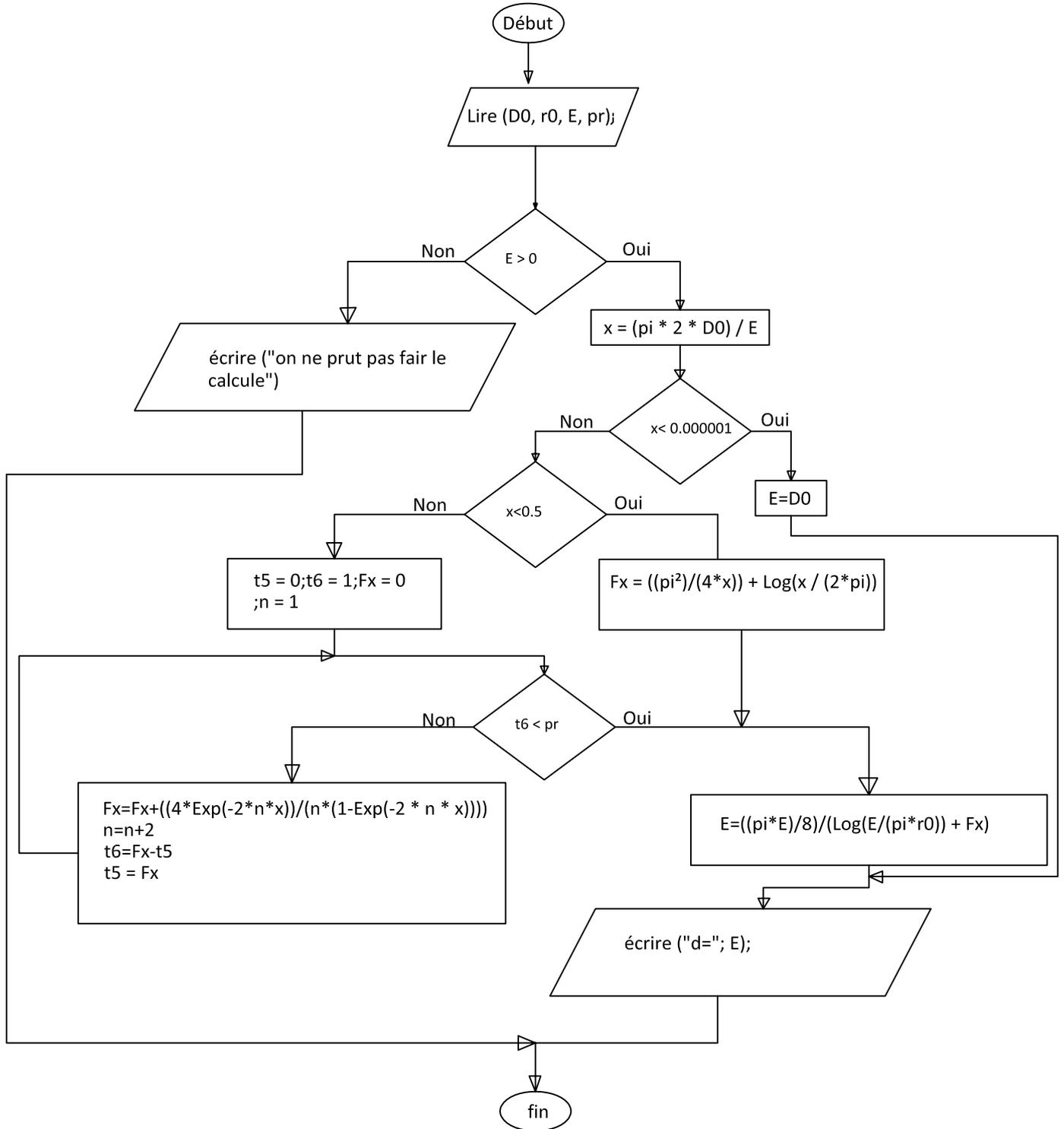


FIGURE VIII.10

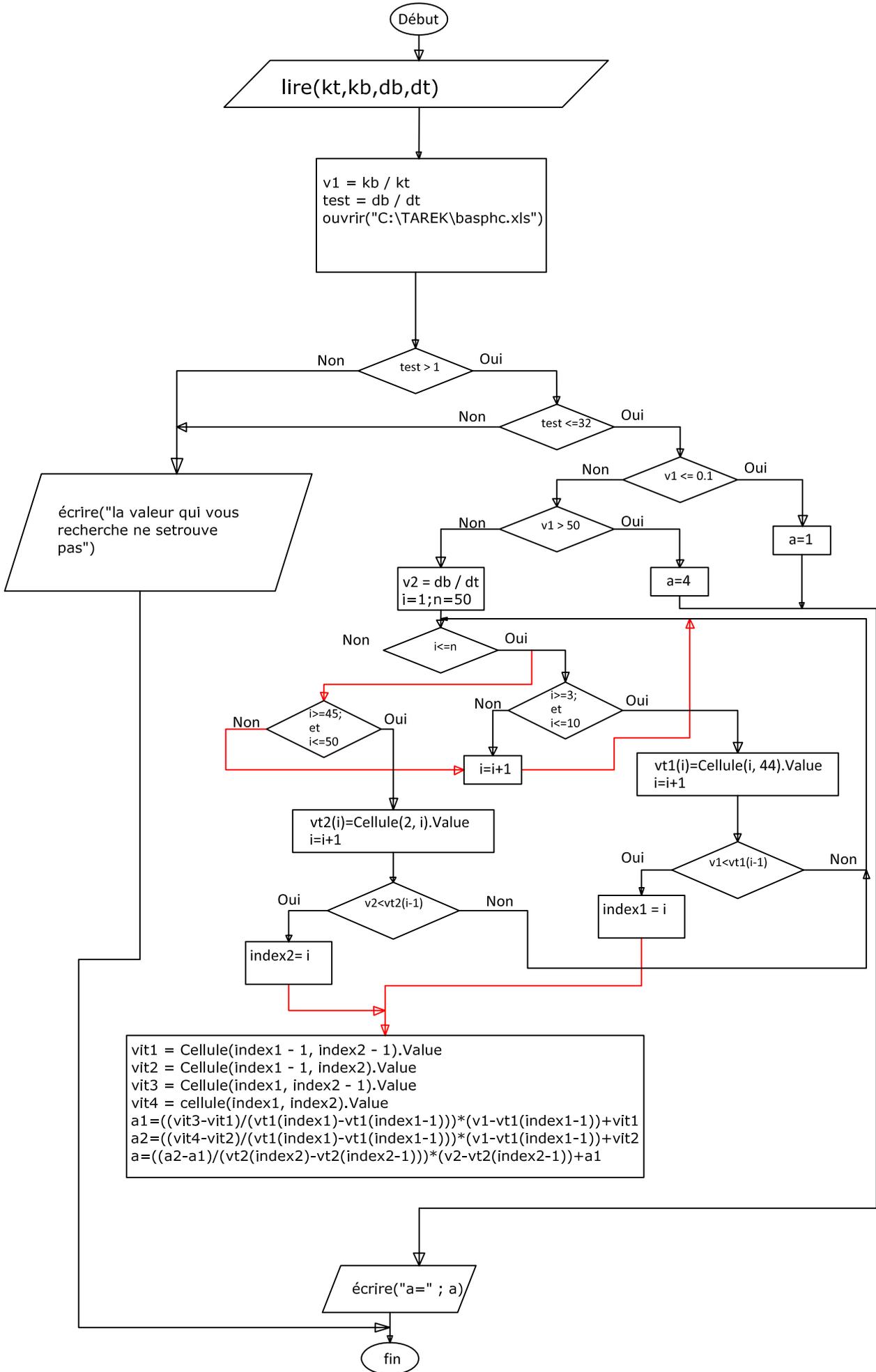
Organigramme Fonction
 ecartementrv(d, ht, h0, k, u, t, r0, pr)



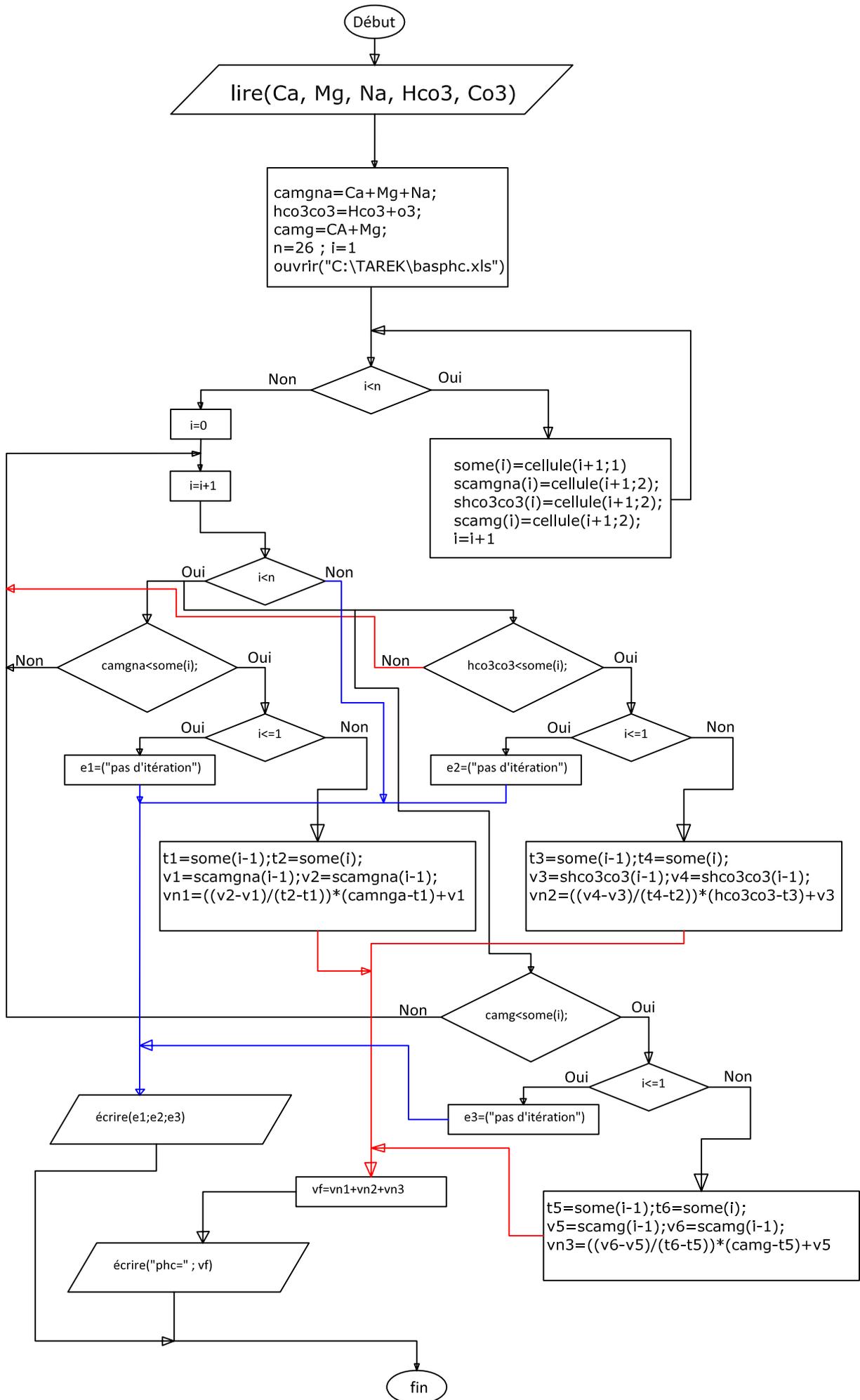
Organigramme Fonction
PRiffec(D0, r0, E, pr)



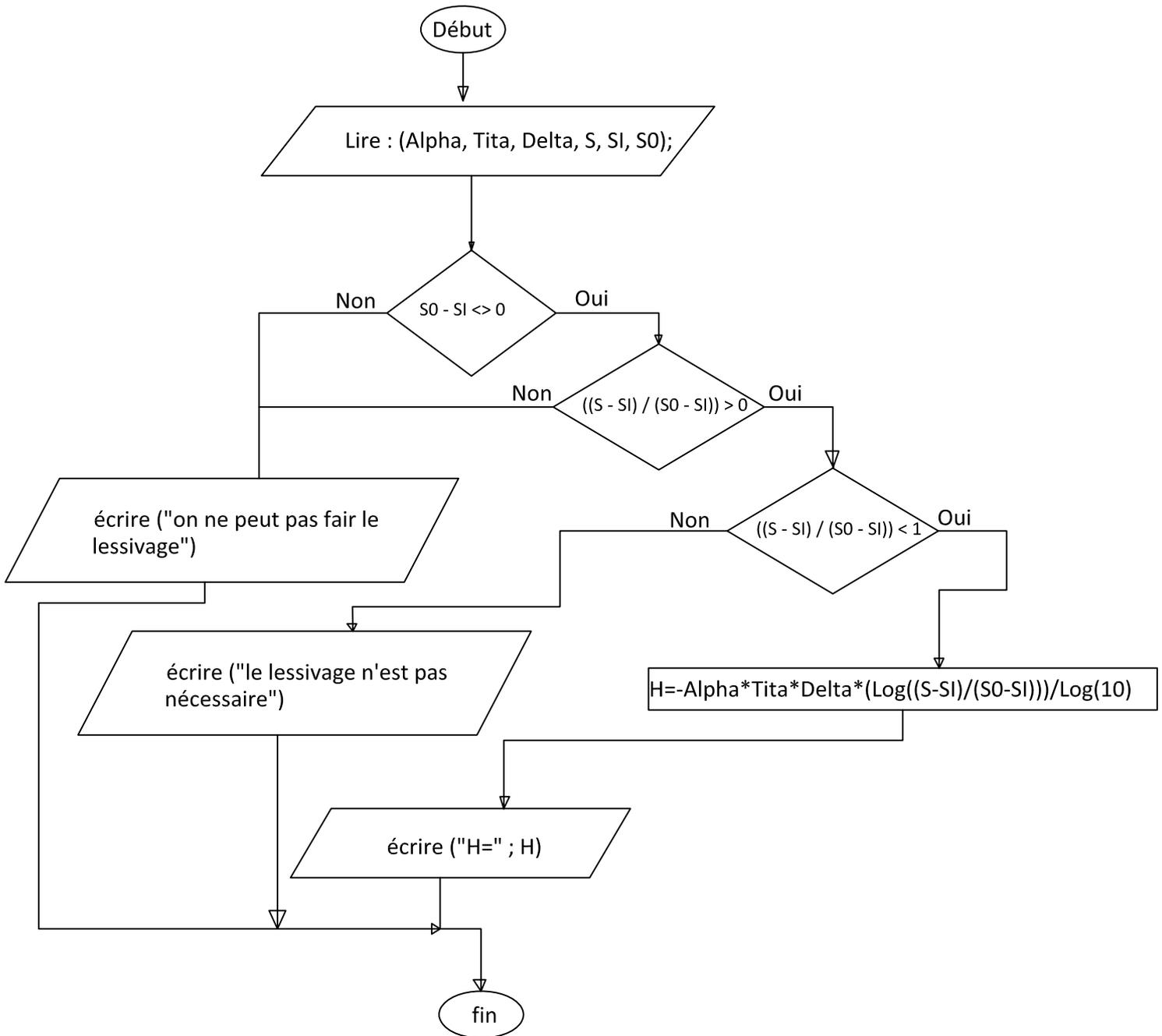
Organigramme Fonction
determiné_a(kt, kb, db, dt)



Organigramme Fonction Phc(Ca, Mg, Na, Hco3, Co3)



Organigramme Fonction
Hvolobuev(Alpha, tita, Delta, S, SI, S0)



Partie Pratique

Chapitre IX :
APPLICATION

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA PLAINE DU MOYEN CHELIFF:

La plaine du Moyen Cheliff est située à **175 KM** de la capitale ;

- À l'ouest, entre le périmètre du Bas et Haut CHELIFF ;
- Avec les coordonnées géographiques suivantes :

Longitude de : **1°06' et 1°42'** de l'Est. Latitude Nord **36°14'**

Avec une surface totale de **21600ha**.

Le périmètre du Moyen Cheliff (P.M.C) s'étend sur une longueur de **60KM** (Est-Ouest) et sur une largeur (Nord-Sud) d'environ **10 KM**.

Il se compose de deux plaines nettement séparées par la zone de collines et le seuil d'Oum-drou.

1. La plaine d'Oued Fodda : S'étend entre le village d'El-Attaf et le seuil d'Oum Drou. Représente une **S.A.U** irrigable d'environ **4539 ha**; constituée de sols de vallée d'Oued Fodda et des alluvions de la rive gauche d'Oued Cheliff.
2. La plaine d'Ech-Chleff comprise entre les seuils d'Oum-Drou et de Boukadir : Représente une **S.A.U** irrigable d'environ **16 435 ha**.

Le bassin du Cheliff se caractérise par une insuffisance ou une mauvaise répartition des pluies (une pluviométrie moyenne de 350mm), une insolation forte avec des variations de températures importantes (environ 40°C); un abaissement thermique accentué en hiver à quelques degrés au-dessous du " zéro " et enfin par des Oueds secs ou forts torrentiels.

Périodiquement, la vallée du Cheliff est soumise à des séries d'années sèches ou d'années humides, et la sécheresse du climat est le principal obstacle au développement de l'agriculture, bien que plus d'un milliard de mètres cubes d'eau s'écoulent à la mer en année.

CLIMATOLOGIE :

Le climat est un facteur primordial qui conditionne la vie végétale ainsi que la production agricole. Tous les facteurs climatiques à savoir : température, vent, précipitation, humidité relative et évaporation influent sur les cultures envisagées dans leur cycle végétatif et sur leurs besoins en eau.

La température :

Les plaines du Cheliff ont un climat spécial du type **continental**, malgré la proximité de la mer. C'est un climat marqué par des étés chauds et secs, des hivers assez froids, tempéré et pluvieux, un printemps assez long et un automne très bref.

Les résultats des mesures élaborés dans la station de Cheliff sont donnés sur le **Tableau IX.1**

Station de CHLEF : Latitude : 36°N 13' No ; Longitude : 1°E 20' Est ; Altitude : 143 m

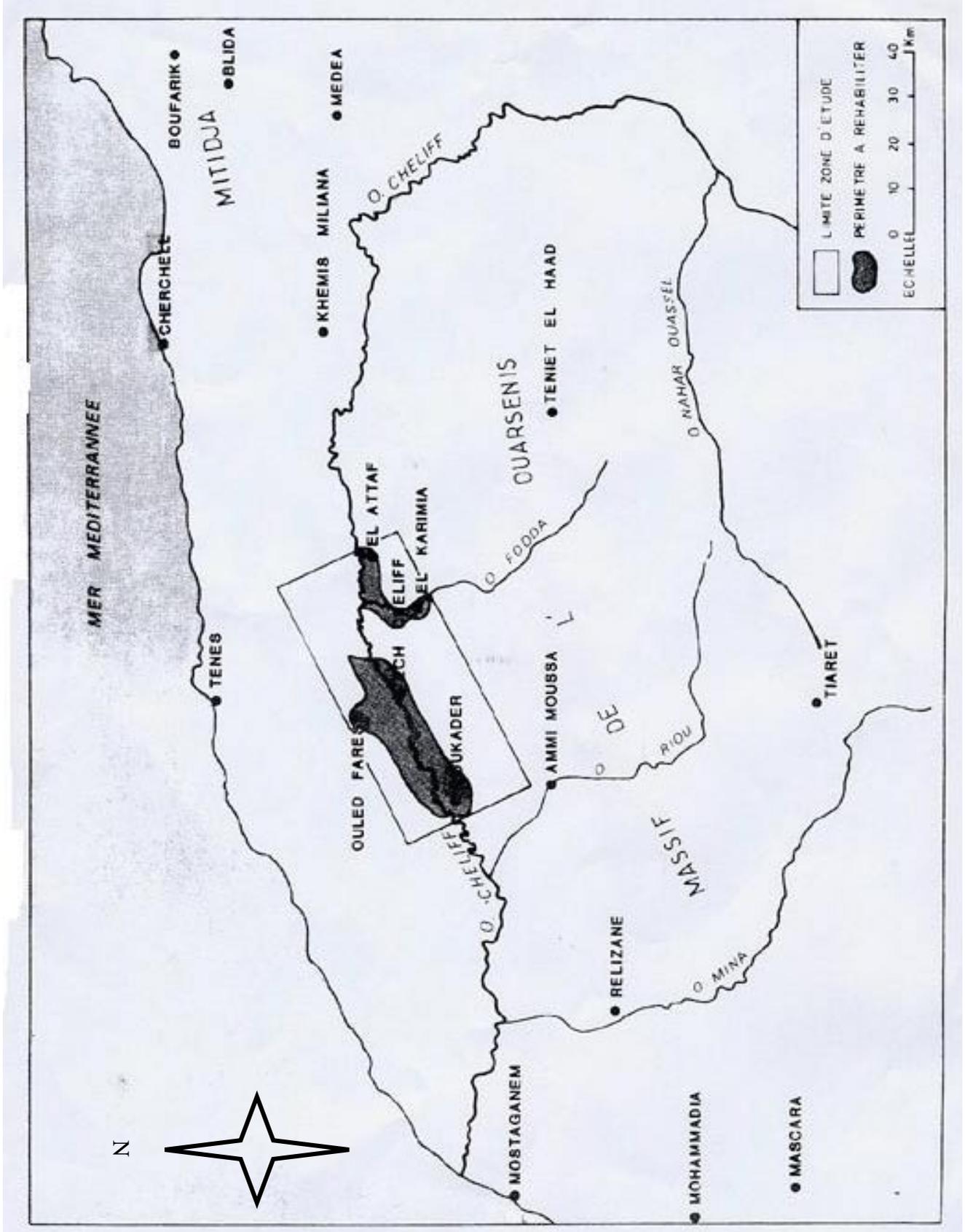


Figure IX.1 : CARTE DE SITUATION DU PÉRIMETRE DU MOYEN DE CHELIFF.

Tableau IX.1 : Températures mensuelles et annuelles de CHLEF (°c) (Période : 1987-2008)

mois t°(c)	S	O	N	D	J	F	M	A	M	JUI	JUL	A	MOYENNNE ANNUELLE
max	32.5	26.8	20.2	16.4	15.9	17.6	20.9	23.3	28.2	34	37.8	37.6	25.9
min	19.4	15.6	10.2	7.2	6.0	6.6	8.5	10.3	14.4	18.8	21.9	22.5	13.5
moy	25.5	20.6	14.7	11.7	10.5	11.5	14.3	16.4	21.0	26.3	29.6	29.8	19.3

Source :(INSID) Alger

Les précipitations :

La pluviométrie est d'un régime variable et irrégulier suivant les mois et les années sachant que les pluies moyennes interannuelles sont de l'ordre de 354,48 mm

Tableau IX.1 : Série pluviométrique (station Ouled fares 1972–2009):

Années	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août	Annuelle
1972	15,1	41,4	36	32,2	79,4	113,2	38,9	22,2	0	10,5	1	1,2	391,10
1973	85,2	6	6,6	93,3	6,2	106,1	78	123,9	3,1	7,6	0	0	516,00
1974	5	72,7	28	2,9	17,8	42,1	110,6	46,1	42,8	6,4	0	0	374,40
1975	0,9	0,3	88,6	65,2	29,9	113,3	17,2	46,8	32,4	20,5	2,9	0	418,00
1976	31,5	93,3	25,7	105,2	77,6	27,8	8,7	14,6	101,6	18,1	3,3	0	507,40
1977	0,3	17,5	34,7	49,2	107,3	13,6	56,3	77,8	27,4	0	0	0	384,10
1978	0	120,6	39,6	43,8	53,5	164,5	68	44,6	3,6	14,4	0,3	0	552,90
1979	38,1	56	42,8	72,8	67,9	15,6	53,3	28,2	37,4	0,5	1,1	0	413,70
1980	8,1	9,1	10,8	167,6	34,2	72,3	32,5	67,9	9,9	0,8	0	0	413,20
1981	14,9	13,7	0	42,7	30,7	76,7	12,9	19	19,3	0	0,2	0	230,10
1982	27,5	64,4	101,9	72,4	0	57,1	30,1	3,1	0,8	0	1,1	0	358,40
1983	0	2,5	58,6	40,7	26,3	32,6	46,8	20,2	55,5	10,7	7	0	300,90
1984	8,6	36,2	52,1	58,6	35,2	26,2	68,2	9,9	42,7	2,8	0	0	340,50
1985	5,2	35,3	72,2	42,2	86,4	90,4	39,2	16,8	0	27,9	1,6	0	417,20
1986	37,8	65,7	31,2	139,9	30,2	98,2	4,8	1,2	6,6	5,1	0	1,3	422,00
1987	11,3	22,5	61	29,4	52,8	4,8	30,4	21,3	45,7	5,9	0	0	285,10
1988	0,7	9,8	21,8	86,9	11,7	16,2	58,7	26,6	2	13,3	1,1	0	248,80
1989	12,7	1,3	26,3	15	44,8	0	51,1	53	17,6	4,4	2,4	0	228,60
1990	4,5	60,5	68,2	55,4	30	61,8	78,6	21,6	9	4,8	0,5	0	394,90
1991	2,7	21	25,6	1,8	56,5	24,8	67,9	33,9	48,8	25,8	4,9	0	313,70
1992	0	25,3	13,1	27,1	5,1	39,5	15	65,6	13,2	0,8	0	0,6	205,30
1993	15,2	17,4	41,9	19,2	39,2	42,2	1,1	22	14,1	0	0	0	212,30
1994	49,1	26,8	33,4	17,9	60,8	30,5	34,5	11,9	0	4,4	0	6,3	275,60
1995	27,9	27,4	32,6	33,8	43	101,9	90,1	44,2	28,9	3,2	6,8	2,4	442,20
1996	58,1	18,3	13,9	28,4	70,5	4,4	0	135,8	12,7	0,8	1,3	8,4	352,60
1997	38,9	25,4	114,2	31,1	7,6	16,3	12,3	64,9	69,9	0,8	0	0	381,40
1998	10,2	12,2	16,6	14,4	83,3	64,5	65,6	3,1	4,3	0	0	0	274,20
1999	36,2	13,2	44,3	108,1	4,7	0	15,3	15,9	6,7	0	7,1	0	251,50
2000	21,4	72,5	52,6	27	74,6	22,7	1,3	21,1	11,7	0	0	0	304,90
2001	31,1	3,2	134,4	33,2	17,3	13,3	49,7	51,6	34,8	0,3	0	7,9	376,80
2002	0	17,2	70,6	32,7	77,2	37,8	13,1	40,3	25,3	2	0	11,6	327,80

Suite du **Tableau IX.1** :

Années	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août	Annuelle
2003	1,9	32,8	61,2	50,9	29,1	42,5	15,2	13,8	59,1	4,3	0	0,8	311,60
2004	9,3	47,2	25,2	82,1	18,3	75,4	21,3	4,9	0,7	0	0	0,7	285,10
2005	9,4	24,5	67,6	55,1	29,6	83,4	9,1	14,2	51,8	2,8	0	4,4	351,90
2006	9,9	4,5	0	119,1	30,4	55,3	62,4	93,3	13	0	0	0	387,90
2007	32,4	76,6	55,6	15,6	19,9	33,9	32,8	11,2	36,4	6	8,7	0	329,10
2008	8,2	18,1	48,4	83,7	76,2	26,4	40	101,5	12,3	3	0	2,5	420,30
2009	54,7	3,6	53,5	60,8	42,1	128,4	52,1	25	12,3	4,4	0	31,7	468,60

Source : ANRH.

TABLEAU IX.2 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) Période (1972-2009)

mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août	annuelle.
P(mm)	19,05	32,00	45,02	54,14	42,30	51,99	39,03	37,87	24,04	5,59	1,35	2,10	354,48

Source : ANRH.

CALASSIFICATION DU CLIMAT :

Classification du climat selon l'indice de Marton :

L'indice d'aridité ou indice de Marton, est un paramètre qui permet la classification du climat, afin de nous renseigner sur la nécessité ou non de l'irrigation par rapport au climat (voir **Tableau IX.3**).

L'indice d'aridité est donné par l'expression (IX-1).

$$I_A = \frac{P}{T + 10} \dots \dots \dots (IX-1)$$

Avec : I : Indice de Marton.

P : Précipitation annuelle moyenne de la région en (mm/an).

T : Température moyenne annuelle en (°C).

Tableau IX.3: Classification du climat selon Marton.

VALEURS DE I	TYPE DU CLIMAT	IRRIGATION
I<5	Désertique	Indispensable
5<I<10	Très sec	Indispensable
10<I<20	Sec	Souvent indispensable
20<I<30	Relativement humide	Parfois utile
I>30	Humide	Inutile

Pour : $P = 354,5 \text{ mm/an}$
 $T = 19,7^\circ \text{C}$

On aura :

$$I = \frac{354,5}{19,7 + 10} \approx 11,94$$

Selon l'indice d'aridité calculé, on constate d'après la classification ci-dessus que la région est soumise à un régime de climat sec. Par conséquent, **l'irrigation est nécessaire.**

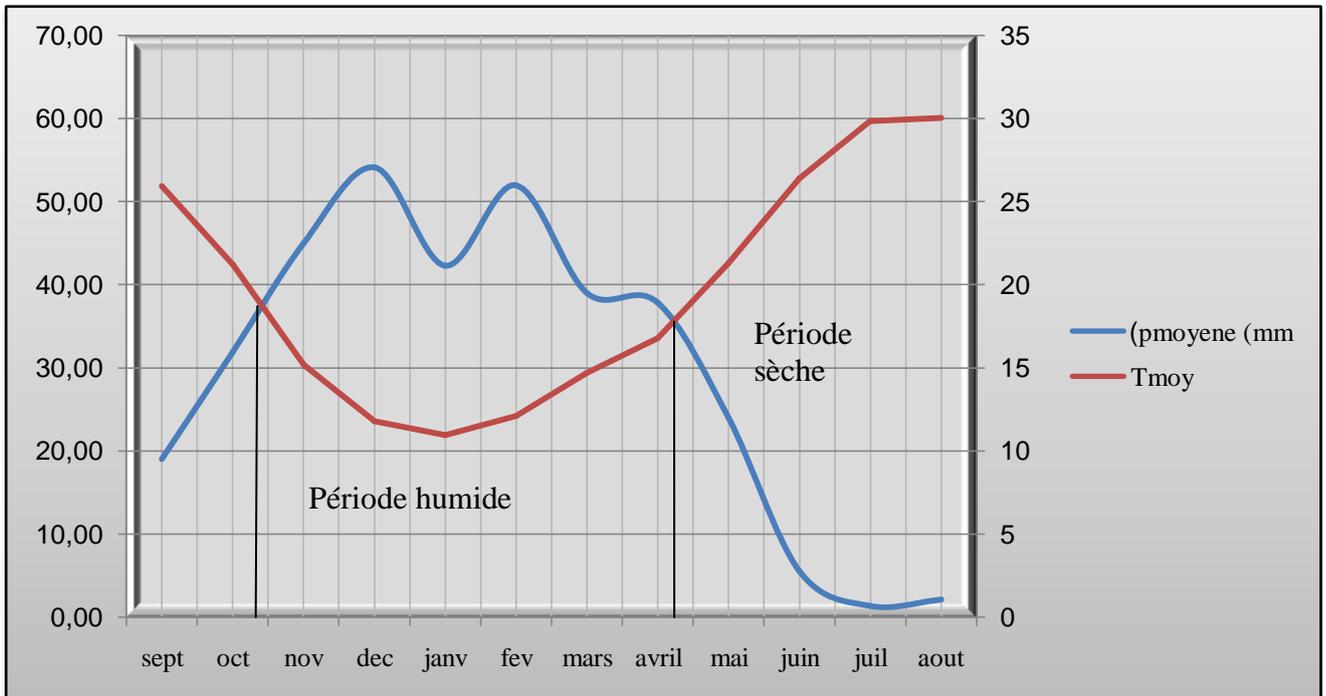


Figure IX.2 : **Climogramme de Gaussen**

Classification du climat selon le diagramme d’Emberger :

La technique est fondée sur un diagramme dressé par Mr Emberger (**figure n°:I-3**) qui nous renseigne sur le climat, ainsi que le type d’hiver dominant d’une région.

Pour cela, nous avons calculé, par l’expression (IX-2), le quotient d’Emberger, que nous avons projeté sur le diagramme bioclimatique.

$$Q = \frac{2000 \times P}{(M + m)(M - m)} \dots\dots\dots(IX-2)$$

Tel que :

P : Précipitation moyenne annuelle de la région en (mm).

M : Température moyenne maximale du mois le plus chaud en (K°).

m : Température moyenne minimale du mois le plus froid en (K°).

Pour :

$$P = 354,1\text{mm.}$$

$$M = 37,8^{\circ}\text{c.}$$

$$m = 6^{\circ}\text{c.}$$

On aura :

$$Q = \frac{2 * 1000 * 354,5}{(37,8 + 273)^2 - (6 + 273)^2} = 37,8$$

D'après le diagramme bioclimatique (figure IX.3), le périmètre du moyen Cheliff a un climat **aride** et caractérisé par des **hivers tempérés**.

Ces renseignements sont d'importance majeure et complètent ceux obtenus précédemment par la méthode de Marton.

Description du périmètre :

Selon l'étude et les caractéristiques pédologiques tirées de la carte pédologique représentée dans la figure IX.4, on distingue cinq classes de sols :

- Classe de sol hydro morphe.
- Verti sols.
- Sols minéraux bruts.
- Sols peu évolués.
- Sols calci-magnésiques.

Les textures prédominantes sont de type :

- 1- Limono-argileux.
 - 2- Argileux.
 - 3- Equilibré.
 - 4- Argilo-limoneux.
 - 5- Argilo-limono-sableux.
- Le niveau de la nappe au niveau des sols varie entre 20 et 120 cm au-dessous de surface.
 - La salinité des sols quant à elle varie entre 3 et 19 mmho/cm .

L'eau d'irrigation du périmètre provient du barrage d'Oued Fodda, dont la salinité est d'environ 2.48 mmho/cm.

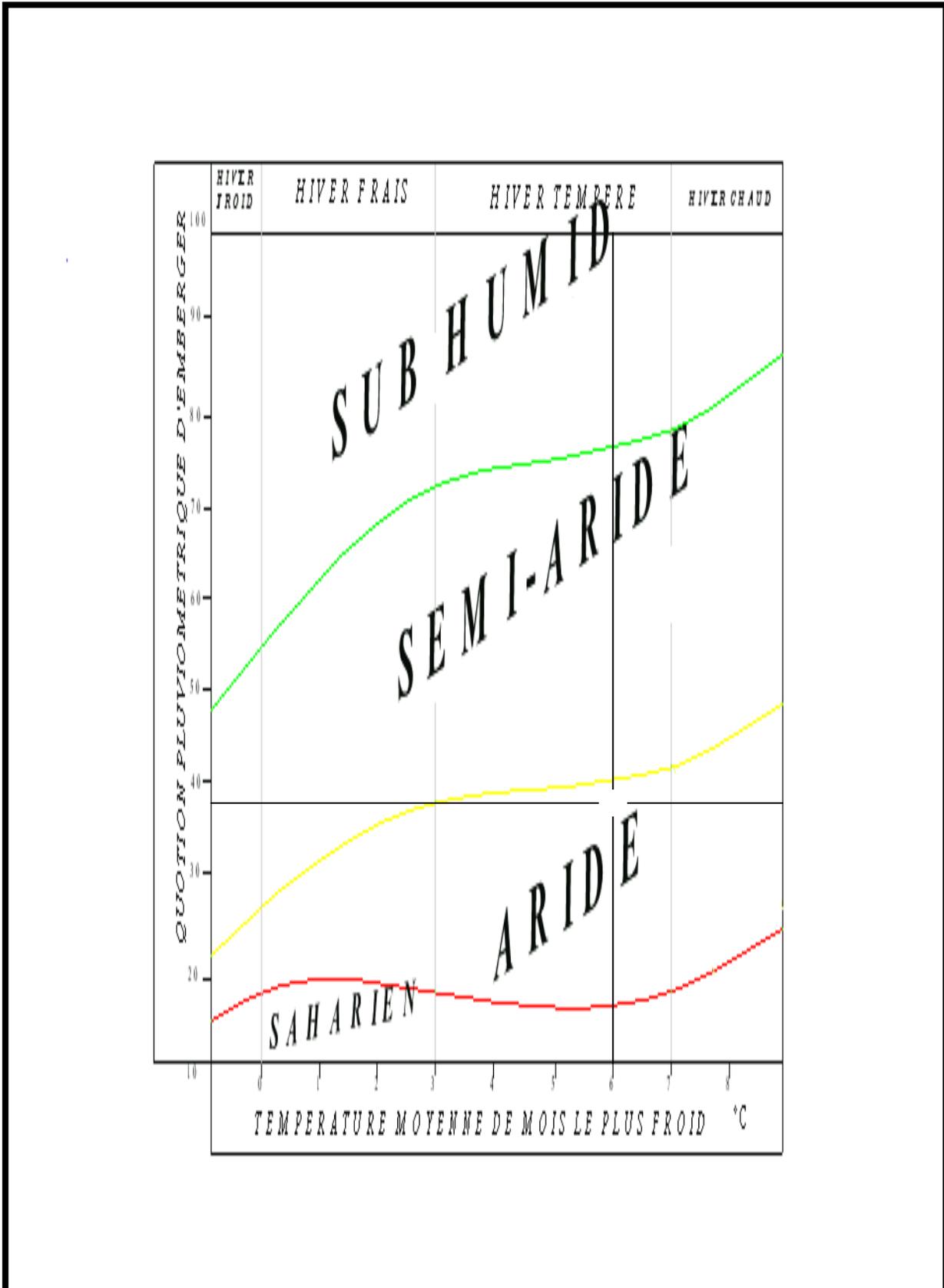


Figure. IX.3 : Diagramme bioclimatique d'Emberger.

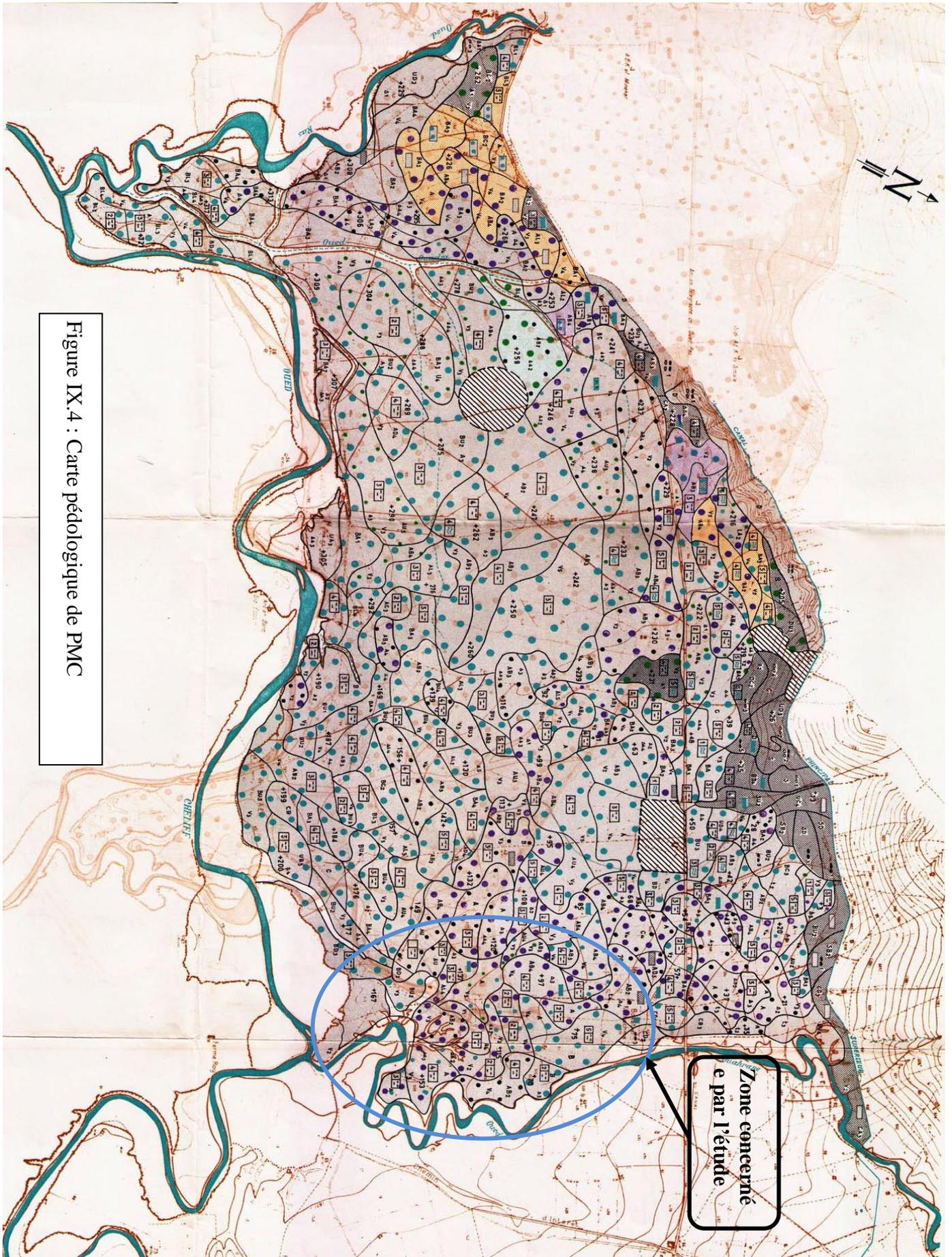


Figure IX.4 : Carte pédologique de PMC

LEGENDE

CLASSE DES SOLS MINERAUX BRUTS
 GROUPE D'APPORT ALLUVIAL
 GROUPE D'APPORT COLLUVIAL

CLASSIF DES SOLS PEU EVOLUES
 SOUS-CLASSE DES SOLS PEU EVOLUES NON CLIMATIQUES
 GROUPE DES SOLS D'APPORT ALLUVIAL
 SOUS-GROUPE MODAL

FAMILLE INDIFFERENCIÉE
 Série modale
 FACIES A TENDANCE BRUN CALCAIRE
 Série modale
 Série reposant sur sol hydromorphe
 Série reposant sur colluvions
 Série hydromorphe à caractères salins

SOUS-GROUPE A CARACTERES VERTIQUES
 FAMILLE INDIFFERENCIÉE
 Série modale
 Série reposant sur colluvions
 Série reposant sur un niveau hydromorphe peu évolué
 Série à caractères hydromorphes
 Série à caractères hydromorphes et salins

SOUS-GROUPE A CARACTERES HYDROMORPHES
 Série modale
 Série à caractères salins
 Série à caractères vertiques
 Série à caractères vertiques et salins

GROUPE DES SOLS D'APPORT COLLUVIAL
 SOUS-GROUPE MODAL
 FAMILLE INDIFFERENCIÉE
 Série modale
 Série reposant sur alluvions
 Série reposant sur alluvions hydromorphes
 Série reposant sur niveau vertique et hydromorphe

CLASSE DES VERTISOLS
 SOUS-CLASSE DES VERTISOLS A DRAINAGE EXTERNE POSSIBLE
 GROUPE DES VERTISOLS A STRUCTURE ARRONDIE
 (sur ou moins les 15cm supérieurs)
 SOUS-GROUPE MODAL
 Série reposant sur colluvions hydromorphes
 SOUS-GROUPE HYDROMORPHE
 Série modale

CLASSE DES VERTISOLS
 SOUS-CLASSE DES VERTISOLS A DRAINAGE EXTERNE POSSIBLE
 GROUPE DES VERTISOLS A STRUCTURE ARRONDIE
 (sur ou moins les 15cm supérieurs)
 SOUS-GROUPE MODAL
 Série reposant sur colluvions hydromorphes
 SOUS-GROUPE HYDROMORPHE
 Série modale

CLASSE DES VERTISOLS
 SOUS-CLASSE DES VERTISOLS A DRAINAGE EXTERNE POSSIBLE
 GROUPE DES VERTISOLS A STRUCTURE ARRONDIE
 (sur ou moins les 15cm supérieurs)
 SOUS-GROUPE MODAL
 Série reposant sur colluvions hydromorphes
 SOUS-GROUPE HYDROMORPHE
 Série modale

CLASSE DES VERTISOLS
 SOUS-CLASSE DES VERTISOLS A DRAINAGE EXTERNE POSSIBLE
 GROUPE DES VERTISOLS A STRUCTURE ARRONDIE
 (sur ou moins les 15cm supérieurs)
 SOUS-GROUPE MODAL
 Série reposant sur colluvions hydromorphes
 SOUS-GROUPE HYDROMORPHE
 Série modale

CLASSE DES SOLS CALCIMAGNESIQUES
 SOUS-CLASSE DES SOLS CARBONATES
 GROUPE DES SOLS BRUNS-CALCAIRES
 SOUS-GROUPE MODAL

Série modale
 Série reposant sur sol peu évolué
 Série reposant sur sol peu évolué hydromorphe

SOUS-GROUPE VERTIQUE
 Série modale
 Série reposant sur sol peu évolué

CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES
 SOUS-CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES MINERAUX
 GROUPE DES SOLS HYDROMORPHES A PSEUDOGLEY
 SOUS-GROUPE A PSEUDOGLEY DE SURFACE
 Série modale
 Série halomorphe

SYMBOLES
 Cailloux en surface
 Cailloux en profondeur
 Taches de gley
 Taches de pseudogley
 Tiratification
 Nappe
 Horizon mal drainant
 Amas salins
 Zone d'habitations
 Profil échantillonné (Référence labo - B)

TEXTURES
 Argileux, Argilo-limoneux
 Limono-argileux
 Equilibré
 Limoneux
 Limono-sableux
 Sable-limoneux, Sable-argileux
 Sableux-sablonneux

CATEGORIES DE PROFONDEUR
 0 à 30 cm
 30 à 50 cm
 50 à 80 cm
 80 à 120 cm
 120 à 150 cm
 > à 150 cm

CONDUCTIVITE EN mhos/cm
 de 2 à 4
 de 4 à 7
 de 7 à 16
 de 16 à 80
 > 80

Suite de Figure IX.4 : la carte pédologique de PMC

Traitement des données pluviométriques :

Afin d'estimer le déficit des précipitations pour les besoins en eau d'irrigation, une analyse statistique sera faite pour déterminer la fraction des pluies qui contribuent effectivement à couvrir les besoins en eau d'une culture, nous proposons quelques définitions des précipitations :

Précipitation moyenne mensuelle :

Moyenne déterminée mathématiquement pour une série de relevés pluviométriques, la pluviométrie mensuelle moyenne est donnée sur le Tableau **IX.1**.

Précipitation du projet (ou année du calcul) :

La quantité de précipitations sur laquelle on peut compter quatre années sur cinq, correspond à une probabilité de 80% et représente une année « normale sèche », donc c'est la précipitation qui est utilisée dans le dimensionnement d'un réseau d'irrigation ou d'un réseau du drainage, appelé souvent précipitation du projet.

$$P_{sec} = \frac{P_{80\%}}{P_{50\%}} P_{moy} \dots\dots\dots(\mathbf{IX.3})$$

- $P_{80\%}$: Pluie de probabilité de 80 %.
- $P_{50\%}$: Pluie de probabilité de 50 %.
- P_{moy} : Pluie moyenne mensuelle interannuelle.

Etude hydrologique :

Détermination de la pluie de l'année sèche avec l'utilisation du logiciel de HYDROLAB.

On trouve les résultats mentionnés dans le **Tableau IX.5**.

Tableau IX.5 : Ajustement par la loi log-normale.

Ajustement à une loi Log-normale								
Taille n=38		Moy.log(xx0)=2,536946022			I.C. à (en%)=95		U Gauss=1,282	
xo=0		E.T. log(x-xo)=0,107627566						
Valeurs du départ	Valeurs classées	Ordre du classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
391,1	205,3	1	0,013	-2,222	205,3	198,519	177,795	216,32983
516	212,3	2	0,039	-1,757	212,3	222,752	202,844	239,95156
374,4	228,6	3	0,066	-1,508	228,6	236,931	217,568	253,78983
418	230,1	4	0,092	-1,328	230,1	247,745	228,807	264,37755
507,4	248,8	5	0,118	-1,183	248,8	256,815	238,224	273,2921
384,1	251,5	6	0,145	-1,059	251,5	264,812	246,513	281,18728
552,9	274,2	7	0,171	-0,950	274,2	272,086	254,035	288,4039
413,7	275,6	8	0,197	-0,851	275,6	278,847	261,005	295,14533
413,2	285,1	9	0,224	-0,760	285,1	285,23	267,563	301,54462
230,1	285,1	10	0,250	-0,674	285,1	291,33	273,806	307,695
358,4	300,9	11	0,276	-0,593	300,9	297,217	279,806	313,66558
300,9	304,9	12	0,303	-0,516	304,9	302,944	285,617	319,51004
340,5	311,6	13	0,329	-0,442	311,6	308,555	291,283	325,27187
417,2	313,7	14	0,355	-0,371	313,7	314,086	296,839	330,98777
422	327,8	15	0,382	-0,301	327,8	319,566	302,316	336,68981
285,1	329,1	16	0,408	-0,233	329,1	325,024	307,739	342,4071

Suite du Tableau IX.5

Valeurs du départ	Valeurs classées	Ordre du classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
248,8	340,5	17	0,434	-0,165	340,5	330,485	313,134	348,16693
228,6	351,9	18	0,461	-0,099	351,9	335,973	318,523	353,99579
394,9	352,6	19	0,487	-0,033	352,6	341,512	323,928	359,92014
313,7	358,4	20	0,513	0,033	358,4	347,126	329,371	365,96857
205,3	374,4	21	0,539	0,099	374,4	352,848	334,884	372,17838
212,3	376,8	22	0,566	0,165	376,8	358,707	340,49	378,58341
275,6	381,4	23	0,592	0,233	381,4	364,734	346,218	385,22035
442,2	384,1	24	0,618	0,301	384,1	370,964	352,097	392,13138
352,6	387,9	25	0,645	0,371	387,9	377,437	358,162	399,36603
381,4	391,1	26	0,671	0,442	391,1	384,202	364,456	406,9837
274,2	394,9	27	0,697	0,516	394,9	391,318	371,029	415,05713
251,5	413,2	28	0,724	0,593	413,2	398,859	377,942	423,67744
304,9	413,7	29	0,750	0,674	413,7	406,918	385,276	432,96164
376,8	417,2	30	0,776	0,760	417,2	415,621	393,134	443,06428
327,8	418	31	0,803	0,851	418	425,135	401,658	454,19637
311,6	420,3	32	0,829	0,950	420,3	435,698	411,046	466,65775
285,1	422	33	0,855	1,059	422	447,667	421,596	480,89666
351,9	442,2	34	0,882	1,183	442,2	461,607	433,775	497,62925
387,9	468,6	35	0,908	1,328	468,6	478,506	448,402	518,11105
329,1	507,4	36	0,934	1,508	507,4	500,346	467,109	544,87418
420,3	516	37	0,961	1,757	516	532,195	494,047	584,42784
468,6	552,9	38	0,987	2,222	552,9	597,16	547,994	666,76439

Tableau IX.6 : Valeurs qui correspondent aux $P_{80\%}$; $P_{50\%}$.

Fréquence	U de Gauss	Valeur théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0,2	-0,841	279,5001749	261,6772	295,7988752	279,5	0,200	1,3
0,5	1,01007E-07	344,3071434	326,6429	362,9265947	344,307	0,5	2,0000002

Les résultats obtenus par l'application de notre logiciel sont représentés dans le Tableau IX.7.

Tableau IX.7: Résultats de l'exécution de notre logiciel :

Valeurs du départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
391,100	205,300	1	0,013	-2,222	205,300	198,519	177,795	216,330
516,000	212,300	2	0,039	-1,757	212,300	222,752	202,844	239,952
374,400	228,600	3	0,066	-1,508	228,600	236,931	217,568	253,790
418,000	230,100	4	0,092	-1,328	230,100	247,745	228,807	264,378
507,400	248,800	5	0,118	-1,183	248,800	256,815	238,224	273,292
384,100	251,500	6	0,145	-1,059	251,500	264,812	246,513	281,187
552,900	274,200	7	0,171	-0,950	274,200	272,086	254,035	288,404
413,700	275,600	8	0,197	-0,851	275,600	278,847	261,005	295,145
413,200	285,100	9	0,224	-0,760	285,100	285,230	267,563	301,545
230,100	285,100	10	0,250	-0,674	285,100	291,330	273,806	307,695
358,400	300,900	11	0,276	-0,593	300,900	297,217	279,806	313,666
300,900	304,900	12	0,303	-0,516	304,900	302,944	285,617	319,510
340,500	311,600	13	0,329	-0,442	311,600	308,555	291,283	325,272
417,200	313,700	14	0,355	-0,371	313,700	314,086	296,839	330,988
422,000	327,800	15	0,382	-0,301	327,800	319,566	302,316	336,690

Suite du Tableau IX.7.

Valeurs du départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
85,100	329,100	16	0,408	-0,233	329,100	325,024	307,739	342,407
248,800	340,500	17	0,434	-0,165	340,500	330,485	313,134	348,167
228,600	351,900	18	0,461	-0,099	351,900	335,973	318,523	353,996
394,900	352,600	19	0,487	-0,033	352,600	341,512	323,928	359,920
313,700	358,400	20	0,487	0,033	358,400	347,126	329,371	365,969
205,300	374,400	21	0,461	0,099	374,400	352,848	334,884	372,178
212,300	376,800	22	0,434	0,165	376,800	358,707	340,490	378,583
275,600	381,400	23	0,408	0,233	381,400	364,734	346,218	385,220
442,200	384,100	24	0,382	0,301	384,100	370,964	352,097	392,131
352,600	387,900	25	0,355	0,371	387,900	377,437	358,162	399,366
381,400	391,100	26	0,329	0,442	391,100	384,202	364,456	406,984
274,200	394,900	27	0,303	0,516	394,900	391,318	371,029	415,057
251,500	413,200	28	0,276	0,593	413,200	398,859	377,942	423,677
304,900	413,700	29	0,250	0,674	413,700	406,918	385,276	432,962
376,800	417,200	30	0,224	0,760	417,200	415,621	393,134	443,064
327,800	418,000	31	0,197	0,851	418,000	425,135	401,658	454,196
311,600	420,300	32	0,171	0,950	420,300	435,698	411,046	466,658
285,100	422,000	33	0,145	1,059	422,000	447,667	421,596	480,897
351,900	442,200	34	0,118	1,183	442,200	461,607	433,775	497,629
387,900	468,600	35	0,092	1,328	468,600	478,506	448,402	518,111
329,100	507,400	36	0,066	1,508	507,400	500,346	467,109	544,874
420,300	516,000	37	0,039	1,757	516,000	532,195	494,047	584,428
468,600	552,900	38	0,013	2,222	552,900	597,160	547,994	666,764

Tableau IX.8 : Valeurs correspondant aux $P_{80\%}$; $P_{50\%}$ à partir de notre logiciel :

Fréquence	U de Gauss	Valeur théo.
0,2	-0,841	279,5001749
0,5	1,01007E-07	344,3071434

D'après cette comparaison, on trouve une différence très minime et d'ordre de $1,9412 \cdot 10^{-11}$ ainsi que les deux graphiques sont confrontées (figure IX.5).

Précipitation du projet :

La précipitation du projet est donnée sur le Tableau IX.9 :

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Annuelle.
totale	724,00	1216,00	1710,80	2057,40	1607,30	1975,70	1483,10	1439,00	913,40	212,30	51,30	79,80	13470,10
pm	19,05	32,00	45,02	54,14	42,30	51,99	39,03	37,87	24,04	5,59	1,35	2,10	354,48
psec	15,48	26,00	36,59	44,00	34,37	42,25	31,72	30,77	19,54	4,54	1,10	1,71	287,15

Les valeurs sont en (mm).

On considère qu'une pluie inférieure à 5mm ne participe pas à l'irrigation alors qu'une pluie supérieure à 5 mm est estimée de 80%, c'est une valeur influant sur les besoins des plantes selon le bilan suivant :

$$B = P + RFU - ETR \dots\dots\dots(IX.4)$$

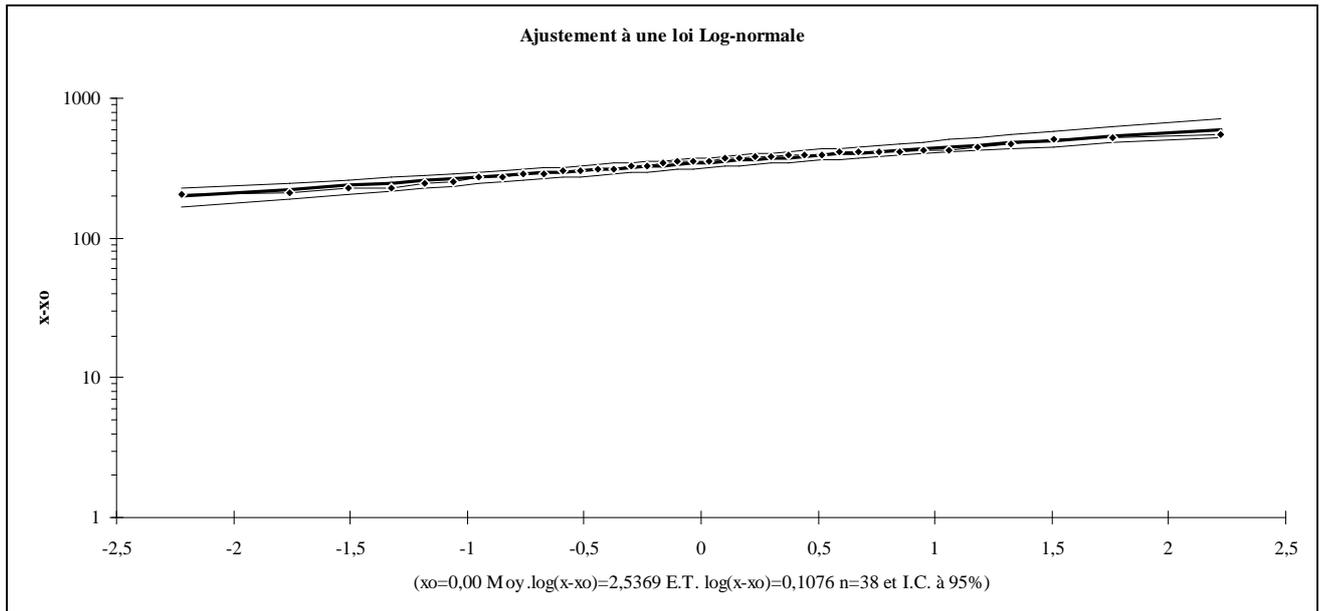


Figure IX.5 : Représentation visuelle de l'ajustement.

On va choisir le type des cultures en fonction du type du sol et en fonction des caractéristiques du sol. Pour cela, on va vous présenter la carte de texture de la zone choisie comme la montre la figure IX.6.

Selon la figure IX.4, on distingue deux zones en fonction du taux de la salinité.

Tableaux IX.10 Résumé des caractéristiques de chaque zone :

Sous zone et sa surface en (ha)	Texture	Culture	surface		Profondeur d'horizon (cm)	Profondeur de la nappe (cm)
			ha	%		
A1	Argile	Blé	71,467084	49,7492811	infinie	60
	Argilo-limoneux	Orge	15,020852	10,4562345	80	100
143,654506	Limono-argileux	Blé	21,98858	15,3065717	40	60
	Equilibrée	Blé	35,17799	24,4879127	50	115
A2	Argile	Soja	119,32814	44,7017382	inf	50
	Argilo-limoneux	Orge	110,126043	41,2545234	100	100
266,942953	Limono-argileux	Blé	5,45494	2,0434853	60	60
	Argilo-limono-sableux	Orge	32,03383	12,0002531	90	100

Le choix de culture se fait en fonction de tolérance des plantes au sel, on prend en considération la limite de la chute du rendement à 10% (ANNEXE A).

1- Salinité : elle varie généralement entre 3 et 11 mmhos/cm. On remarque que la salinité est plus grande dans les zones hautes.

L a zone A1 : Elle varie de 3 à 11 mmhos/cm, cette zone est caractérisée par un sol très salin. On peut prendre une valeur moyenne de 7 mmho/cm.

L a zone A2 : Elle varie de 3 à 5 mmho/cm, cette zone est caractérisée par un sol salin, dont la salinité moyenne est de 4 mmho/cm.

Calcul d'évaporation à partir de la série pluviométrique :

À partir de la série pluviométrique, on calcule la pluie moyenne mensuelle et l'évaporation potentielle par la formule de **BLANEY-CRIDDLE** qui est donnée par :

$$ET_0 = (8.13 + 0.46t)p$$

Avec :

ET_0 : Évapotranspiration de référence [mm/mois].

t : Température moyenne mensuelle [°c].

p : Pourcentage d'éclairement en fonction d'altitude.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableaux IX.11 : Évapotranspiration de référence.

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.
PM(mm)	0,64	1,05	1,50	1,78	1,42	1,86	1,28	1,26	0,83	0,19	0,04	0,07
Tmoy(°c)	25,95	21,20	15,20	11,80	10,95	12,10	14,70	16,80	21,30	26,40	29,85	30,05
Eclairement(%)	12,30	11,20	10,10	9,60	9,80	10,70	11,80	13,00	13,90	14,40	14,20	13,40
ET0 (mm/j)	8,23	6,68	5,09	4,34	4,30	4,88	5,86	6,87	8,31	9,73	10,35	9,81

Pour calculer les valeurs nécessaires au dimensionnement d'un réseau de drainage, on va appliquer notre logiciel sur les données mentionnées précédemment et on trouve les résultats représentés dans les tableaux suivants : Tableau IX.12, Tableau IX.13, Tableau IX.14.

Tableaux IX.12 : Résultats du 1^{er} trimestre.

année	sept							oct.							nov.						
	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j
1972	6,9	8,2	0	0	0	0	0	13	0	0	12,9	0	0	0	12,7	0	16,3	0	0	0	0
1973	85	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4	2,4	0	0	0	0	0
1974	0	5	0	0	0	0	0	5,5	3	0	38,8	0	0	0	2,3	25,7	0	0	0	0	0
1975	0,5	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	13,5	0	29,6	0	0	0	0
1976	2,3	29,2	0	0	0	0	0	0,2	6	11,3	41,4	0	0	0	0,8	4,8	7,9	12,2	0	0	0
1977	0,3	0	0	0	0	0	0	1	11,6	4,9	0	0	0	0	9,4	0	0	0	0	25,3	0
1978	0	0	0	0	0	0	0	0	49,8	0	0	70,8	0	0	1	0	36,5	0	0	0	0
1979	0,9	1	0	0	0	35,8	0	1,4	10	0	34,1	0	0	0	1	6,2	9,1	0	26,5	0	0
1980	7,8	0	0	0	0	0	0	4,5	0	0	0	0	0	0	5,5	0	0	0	0	0	0
1981	0	14,9	0	0	0	0	0	0	0	0	13,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982	26,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59,6	0	0	14,5	0	0	0	58,1	0	0
1983	0	0	0	0	0	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	19	30,2	0	0	0	0	0
1984	7,9	0	0	0	0	0	0	0,9	28,1	0	0	0	0	0	10,8	5,7	0	0	32,8	0	0
1985	0	0	5,2	0	0	0	0	0	0	35,3	0	0	0	0	6,2	19,9	42,1	0	0	0	0
1986	34,2	0	0	0	0	0	0	18,3	12,3	10,6	0	0	0	0	0,8	0	4,7	0	25,2	0	0
1987	0	11,3	0	0	0	0	0	0,6	8,7	0	0	0	0	0	10,3	0	0	17,3	29,4	0	0
1988	0,7	0	0	0	0	0	0	2,4	6,5	0	0	0	0	0	0,8	15,5	5,5	0	0	0	0
1989	2,9	8,4	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0	0	0	0	0,9	13,6	0	0	0	0	0
1990	4,5	0	0	0	0	0	0	5,5	29,9	0	0	0	0	0	0	0	4,8	0	34,2	0	0
1991	0,7	1,6	0	0	0	0	0	18,4	0	0	0	0	0	0	0	2,6	0	0	21,8	0	0
1992	0	0	0	0	0	0	0	2,7	15,7	0	0	0	0	0	0,6	10,8	0	0	0	0	0
1993	14,6	0	0	0	0	0	0	1,2	0	14,6	0	0	0	0	3,4	18,1	0	0	0	0	0
1994	41,4	4,5	0	0	0	0	0	0	9,4	0	0	10,9	0	0	20,3	13,1	0	0	0	0	0
1995	2,5	25,4	0	0	0	0	0	27,4	0	0	0	0	0	0	8,1	0	0	0	24,5	0	0
1996	52,8	0	0	0	0	0	0	0	9,7	0	0	0	0	0	0,9	0	12,4	0	0	0	0
1997	8,2	0	22,2	0	0	0	0	2,1	2,3	20,1	0	0	0	0	11,4	48,1	10,5	0	22,1	0	0
1998	5,4	0	0	0	0	0	0	12,2	0	0	0	0	0	0	7	8,7	0	0	0	0	0
1999	4	30	0	0	0	0	0	5,9	4,1	0	0	0	0	0	5,5	1,2	32,9	0	0	0	0
2000	6,2	0	15,2	0	0	0	0	47,4	14,8	21,1	25,1	0	0	0	1,8	4,7	0	0	44,8	0	0
2001	18,3	0	0	0	0	0	0	3,2	0	0	0	0	0	0	2,4	0	0	0	0	130,5	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	17,2	0	0	0	0	0	6,7	22,1	16	0	0	0	0
2003	0	1,9	0	0	0	0	0	3,8	18,4	0	0	0	0	0	24,2	0	10,7	0	0	0	0
2004	1,4	7,9	0	0	0	0	0	13,9	0	0	29,7	0	0	0	1,9	0	0	21,2	0	0	0
2005	3,5	3,4	0	0	0	0	0	3,8	20,7	0	0	0	0	0	19,8	9,3	4,7	0	0	0	28,6
2006	6,4	3,1	0	0	0	0	0	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	4	26,4	0	0	0	0	0	18,5	0	0	0	48,5	0	0	4,3	0	0	0	49,4	0	0
2008	3	0	0	0	0	0	0	0,4	11,5	0	0	0	0	0	7	9,8	17,1	0	0	0	0
2009	27,2	17,5	0	0	0	0	0	1,3	2,3	0	0	0	0	0	9	31	13,5	0	0	0	0

Tableaux IX.13 : Résultats du 2^{ème} trimestre.

année	dec							jan							fev						
	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j
1972	11,7	7,9	0	0	0	0	0	0	5	19,5	0	0	15,2	39,7	6,5	0	0	38,5	0	0	0
1973	0	3,3	12,5	41,3	0	0	0	3	4,2	0	0	0	0	0	1,9	0	10,2	0	0	0	0
1974	2,5	0	0	0	0	0	0	11,3	4,4	0	0	0	0	0	0	0	14	19	0	0	0
1975	2,9	0	0	17,3	0	44,8	0	0	29,5	0	0	0	0	0	0,4	16,3	0	0	0	0	0
1976	0	0	8,5	0	0	57,8	0	0	0	3,7	23,5	0	0	43,6	1	22,9	0	0	0	0	0
1977	2,4	2,5	0	41,2	0	0	0	39,2	12,4	0	0	0	0	55,7	2,8	0	0	0	8,7	0	0
1978	15,2	0,4	0	27,7	0	0	0	6,7	13,3	0	26,5	0	0	0	0	40,5	12,2	0	0	0	0
1979	0	7,7	0	0	65,1	0	0	0,2	0	0	16,2	0	0	51,5	2,2	1,6	10,5	0	0	0	0
1980	0	0	59,5	0	90	0	0	0,3	0	1	0	0	32,7	0	0	0	33,2	17	0	0	0
1981	3,4	30,7	0	0	0	0	0	0	7,3	15,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982	3,3	17	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0
1983	0	1,2	9,6	29,9	0	0	0	0	8,4	0	13,2	0	0	0	0,3	9	16,8	0	0	0	0
1984	0,3	0	6,7	0	0	0	0	6,8	0	9,6	0	0	18	0	0	11,9	14,3	0	0	0	0
1985	3,1	11,9	8,2	19,3	0	0	0	0,9	6,9	0	59,8	0	0	0	2,1	0	0	4,7	0	0	0
1986	0,1	0	0	62,6	0	0	77,2	1,4	2,7	12,1	0	15,5	0	0	1,1	0	0	45,6	0	0	0
1987	7	9,8	0	0	0	0	0	1	14,3	0	31,8	0	0	0	1,5	1,8	0	0	0	0	0
1988	15,7	59,3	2,9	9	0	0	0	0	6,5	3,7	0	0	0	0	3,4	8,8	0	0	0	0	0
1989	2,9	6,1	0	0	0	0	0	7,2	9,8	0	24,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1990	0	0	0	0	28,4	0	0	2,8	14,5	0	0	0	0	0	7,5	7,4	18,8	14,1	0	0	0
1991	0	1,8	0	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0	55,3	0	0	17,2	7,6	0	0	0
1992	0	14,7	0	7,3	0	0	0	0	5,1	0	0	0	0	0	3	1,5	33,9	0	0	0	0
1993	6,2	7,5	0	0	0	0	0	2,4	19,1	16,5	0	0	0	0	6,4	30,8	0	0	0	0	0
1994	6,8	11,1	0	0	0	0	0	1,6	20,5	0	0	0	0	37,6	0,7	0	29,8	0	0	0	0
1995	3,1	14,3	0	0	0	0	0	3,9	0	0	20,7	0	0	0	12,1	0	0	45,4	21,7	0	0
1996	2,3	0	12,9	0	0	0	0	6	12	24,4	28,1	0	0	0	0	4,4	0	0	0	0	0
1997	7	13,2	5,6	0	0	0	0	4,2	0	0	0	0	0	0	2,7	3,2	7,4	0	0	0	0
1998	0	5,9	7,6	0	0	0	0	0,8	66,6	0	0	0	0	0	5,7	22,3	33,5	0	0	0	0
1999	15,5	4,3	0	0	0	84,8	0	2,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	5,3	0	0	18,5	0	0	0	2,4	16,5	30	0	0	0	0	0	0	0	12,9	0	0	0
2001	6,2	20,9	0	0	0	0	0	0,7	16,1	0	0	0	0	0	12,1	0	0	0	0	0	0
2002	1,7	29,4	0	0	0	0	0	4,4	10,3	10,3	0	41,8	0	0	5,5	6,5	20,4	0	0	0	0
2003	2,6	23,2	0	0	0	0	0	18,4	0	10,7	0	0	0	0	6,4	11,2	24,9	0	0	0	0
2004	1	10,2	31,1	0	0	39,8	0	0	0	11,5	7,1	0	0	0	13	25,5	6,9	0	0	0	0
2005	1,8	0	0	0	53,3	0	0	0,5	33,3	8	0	0	0	0	0	41,1	0	0	0	31	0
2006	0	10,4	30,9	0	0	0	0	18,5	0	8,8	0	0	0	0	6,1	30,3	8,4	0	0	0	0
2007	0	4,4	0	11,7	0	0	0	3,5	0	14,2	0	0	0	0	5,6	4,6	0	0	0	0	0
2008	0,6	0	31,6	0	0	0	0	0	4,3	23,5	0	20,4	0	28	0	1,5	0	0	0	0	24,9
2009	20,3	16,2	14,6	0	0	0	0	4,1	7,5	10,3	15,6	0	0	0	3,5	18,6	0	0	0	0	0

Tableaux IX.14 : Résultats du 3^{ème} trimestre.

année	mar							avr							mais						
	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j
1972	5,2	11,5	12,9	0	0	0	0	0,2	10,8	11,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	0	14,7	6,9	46,4	0	0	0	0,7	24,5	32,6	37,4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
1974	9,8	0	0	23,1	0	50,6	0	1	8,6	9,1	27,4	0	0	0	4	9,2	0	0	21,9	0	0
1975	1,3	9,5	0	0	0	0	0	3,4	14,9	0	16,4	0	0	0	1,4	24,6	15,3	0	0	0	0
1976	0,1	0	8,6	0	0	0	0	0,2	14,2	0	0	0	0	0	0	16,3	4,1	0	91,1	0	0
1977	0,2	6,1	0	0	0	46,9	0	8,6	25,8	0	0	0	0	0	7	16,3	0	0	0	0	0
1978	5,6	48,3	0	8,6	0	0	0	0,4	10,2	33,7	0	0	0	0	2,2	1,4	0	0	0	0	0
1979	0	29,8	0	0	0	0	0	6,7	0	21,5	0	0	0	0	8,8	23,3	0	0	5,3	0	0
1980	1	24,1	0	0	0	0	0	7,6	15,5	18,8	0	0	0	0	4,7	0	0	0	0	0	0
1981	10,8	0	0	0	0	0	0	3,9	0,3	14,5	0	0	0	0	3	15,3	0	0	0	0	0
1982	0	0	0	19,3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0
1983	4,8	1,3	21,9	18,8	0	0	0	11,1	0,7	8,4	0	0	0	0	3,5	4,1	0	0	0	31,7	0
1984	7,1	0	21,7	0	0	0	0	0	7,2	0	0	0	0	0	6,7	15,3	16,1	0	0	0	0
1985	6,4	8,9	0	0	18,3	0	0	2,5	1,6	11,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1986	2,3	2,5	0	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0	0	3,5	0	0	0	0	0	0
1987	0,4	0	0	0	29,7	0	0	0	0	15,4	5,9	0	0	0	2,4	7,2	0	36,1	0	0	0
1988	0	0	35,6	0	0	0	0	1,3	13,4	0	5,8	0	0	0	1,2	0,8	0	0	0	0	0
1989	14,3	0	0	0	0	0	0	1,8	10,1	9,8	29,6	0	0	0	1,4	3,4	9,9	0	0	0	0
1990	7,7	4,6	22,9	36,2	0	0	0	3,2	0	16,3	0	0	0	0	0,8	2,1	4,5	0	0	0	0
1991	14,7	19,2	0	31,3	0	0	0	2,4	0	0	0	0	30,3	0	21,3	0	27,5	0	0	0	0
1992	9,5	3,5	0	0	0	0	0	0	0	23,1	0	0	0	0	0	13,2	0	0	0	0	0
1993	1,1	0	0	0	0	0	0	3,1	5,8	12	0	0	0	0	11,1	0	0	0	0	0	0
1994	11,8	0	16,2	0	0	0	0	1,9	7,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	10,2	0	40,9	0	0	0	0	3	12	16,7	0	0	0	0	4,1	0	24,4	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0	0	0	17,8	23,2	0	0	94,8	0	0	4,3	7,6	0	0	0	0	0
1997	1,5	5,6	0	0	0	0	0	0,6	0	55,5	8,8	0	0	0	0	39,7	12,8	0	0	0	0
1998	10,6	0	34,6	14,8	0	0	0	0	3,1	0	0	0	0	0	0	4,3	0	0	0	0	0
1999	0	15,3	0	0	0	0	0	0,5	6,6	3,9	0	0	0	0	0	4,8	0	0	0	0	0
2000	1,3	0	0	0	0	0	0	0,7	10,6	0	0	0	0	0	4,4	0	0	0	0	0	0
2001	4,3	0	0	0	43,6	0	0	16	0	26,1	0	0	0	0	2,2	31,6	0	0	0	0	0
2002	7,8	0	0	0	0	0	0	0	3,8	33,8	0	0	0	0	6,9	18,4	0	0	0	0	0
2003	0,8	13,8	0	0	0	0	0	3,5	0	0	10,3	0	0	0	4	47	0	0	0	0	0
2004	5,8	4,5	11	0	0	0	0	4,9	0	0	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0
2005	3,6	0	5,3	0	0	0	0	7,4	3,3	0	0	0	0	0	4,1	7,1	0	40,3	0	0	0
2006	0,4	2	12,2	47,8	0	0	0	28,8	0	30,1	0	0	0	26,7	0,5	12,5	0	0	0	0	0
2007	1,2	5,9	20,6	0	0	0	0	0	11,2	0	0	0	0	0	8	11	0	0	0	0	0
2008	0	0	21,9	20,3	0	0	0	3,2	15,5	47,2	0	0	0	0	12,3	0	0	0	0	0	0
2009	6,5	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	1,4	0	9,1	0	0	0	0

D' après ces tableaux on tir les valeur maximal(1j,2j,...) pour chaque trimestre

Tableaux IX.15 : Valeurs maximales journalières.

année	t1							t2							t3						
	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j	1j	2j	3j	4j	5j	6j	7j
1972	13	8,2	16,3	12,9	0	0	0	11,7	7,9	19,5	38,5	0	15,2	39,7	5,2	11,5	12,9	0	0	0	0
1973	85	2,4	0	0	0	0	0	3	4,2	12,5	41,3	0	0	0	3	24,5	32,6	46,4	0	0	0
1974	5,5	25,7	0	38,8	0	0	0	11,3	4,4	14	19	0	0	0	9,8	9,2	9,1	27,4	21,9	50,6	0
1975	13,5	0	29,6	0	0	0	0	2,9	29,5	0	17,3	0	44,8	0	3,4	24,6	15,3	16,4	0	0	0
1976	2,3	29,2	11,3	41,4	0	0	0	1	22,9	8,5	23,5	0	57,8	43,6	0,2	16,3	8,6	0	91,1	0	0
1977	1	11,6	4,9	0	0	25,3	0	39,2	12,4	0	41,2	8,7	0	55,7	8,6	25,8	0	0	0	46,9	0
1978	1	49,8	36,5	0	70,8	0	0	15,2	40,5	12,2	27,7	0	0	0	5,6	48,3	33,7	8,6	0	0	0
1979	1,4	10	9,1	34,1	26,5	35,8	0	2,2	7,7	10,5	16,2	65,1	0	51,5	8,8	29,8	21,5	0	5,3	0	0
1980	7,8	0	0	0	0	0	0	0,3	0	59,5	17	90	32,7	0	7,6	24,1	18,8	0	0	0	0
1981	0	14,9	0	13,7	0	0	0	3,4	30,7	15,1	0	0	0	0	10,8	15,3	14,5	0	0	0	0
1982	26,6	0	0	0	59,6	0	0	3,3	17	32	0	0	0	0	3	0	0	19,3	0	0	0
1983	19	30,2	0	0	0	0	0	0,3	9	16,8	29,9	0	0	0	11,1	4,1	21,9	18,8	0	31,7	0
1984	10,8	28,1	0	0	32,8	0	0	6,8	11,9	14,3	0	0	18	0	7,1	15,3	21,7	0	0	0	0
1985	6,2	19,9	42,1	0	0	0	0	3,1	11,9	8,2	59,8	0	0	0	6,4	8,9	11,3	0	18,3	0	0
1986	34,2	12,3	10,6	0	25,2	0	0	1,4	2,7	12,1	62,6	15,5	0	77,2	3,5	2,5	0	0	0	0	0
1987	10,3	11,3	0	17,3	29,4	0	0	7	14,3	0	31,8	0	0	0	2,4	7,2	15,4	36,1	29,7	0	0
1988	2,4	15,5	5,5	0	0	0	0	15,7	59,3	3,7	9	0	0	0	1,3	13,4	35,6	5,8	0	0	0
1989	2,9	13,6	0	0	0	0	0	7,2	9,8	0	24,2	0	0	0	14,3	10,1	9,9	29,6	0	0	0
1990	5,5	29,9	4,8	0	34,2	0	0	7,5	14,5	18,8	14,1	28,4	0	0	7,7	4,6	22,9	36,2	0	0	0
1991	18,4	2,6	0	0	21,8	0	0	1,2	1,8	17,2	7,6	0	0	55,3	21,3	19,2	27,5	31,3	0	30,3	0
1992	2,7	15,7	0	0	0	0	0	3	14,7	33,9	7,3	0	0	0	9,5	13,2	23,1	0	0	0	0
1993	14,6	18,1	14,6	0	0	0	0	6,2	19,1	30,8	0	0	0	0	11,1	5,8	12	0	0	0	0
1994	41,4	13,1	0	0	10,9	0	0	6,8	20,5	29,8	0	0	0	37,6	11,8	7,4	16,2	0	0	0	0
1995	27,4	26,4	0	0	24,5	0	0	12,1	14,3	0	45,4	21,7	0	0	10,2	12	40,9	0	0	0	0
1996	52,8	9,7	12,4	0	0	0	0	6	12	24,4	28,1	0	0	0	17,8	23,2	0	0	94,8	0	0
1997	11,4	48,1	22,2	0	22,1	0	0	7	13,2	7,4	0	0	0	0	1,5	39,7	55,5	8,8	0	0	0
1998	12,2	7	8,7	0	0	0	0	5,7	66,6	33,5	0	0	0	0	10,6	4,3	34,6	14,8	0	0	0
1999	5,9	30	32,9	0	0	0	0	15,5	4,3	0	0	0	84,8	0	0,5	15,3	3,9	0	0	0	0
2000	47,4	14,8	21,1	25,1	44,8	0	0	5,3	16,5	30	18,5	0	0	0	4,4	10,6	0	0	0	0	0
2001	18,3	2,4	0	0	0	131	0	12,1	20,9	0	0	0	0	0	16	31,6	26,1	0	43,6	0	0
2002	6,7	22,1	16	0	0	0	0	5,5	29,4	20,4	0	41,8	0	0	7,8	18,4	33,8	0	0	0	0
2003	24,2	18,4	10,7	0	0	0	0	18,4	23,2	24,9	0	0	0	0	4	47	0	10,3	0	0	0
2004	13,9	7,9	0	29,7	0	0	0	13	25,5	31,1	7,1	0	39,8	0	5,8	4,5	11	0	0	0	0
2005	19,8	20,7	4,7	0	0	0	28,6	1,8	41,1	8	0	53,3	31	0	7,4	7,1	5,3	40,3	0	0	0
2006	6,4	3,1	0	0	0	0	0	18,5	30,3	30,9	0	0	0	0	28,8	12,5	30,1	47,8	0	0	26,7
2007	18,5	26,4	0	0	49,4	0	0	5,6	4,6	14,2	11,7	0	0	0	8	11,2	20,6	0	0	0	0
2008	7	11,5	17,1	0	0	0	0	0,6	4,3	31,6	0	20,4	0	28	12,3	15,5	47,2	20,3	0	0	0
2009	27,2	31	13,5	0	0	0	0	20,3	18,6	14,6	15,6	0	0	0	6,5	25	9,1	0	0	0	0

On peut donc tracer les courbes HDF à partir de ce tableau.
 Les résultats obtenus sont donnés dans les graphes suivants :

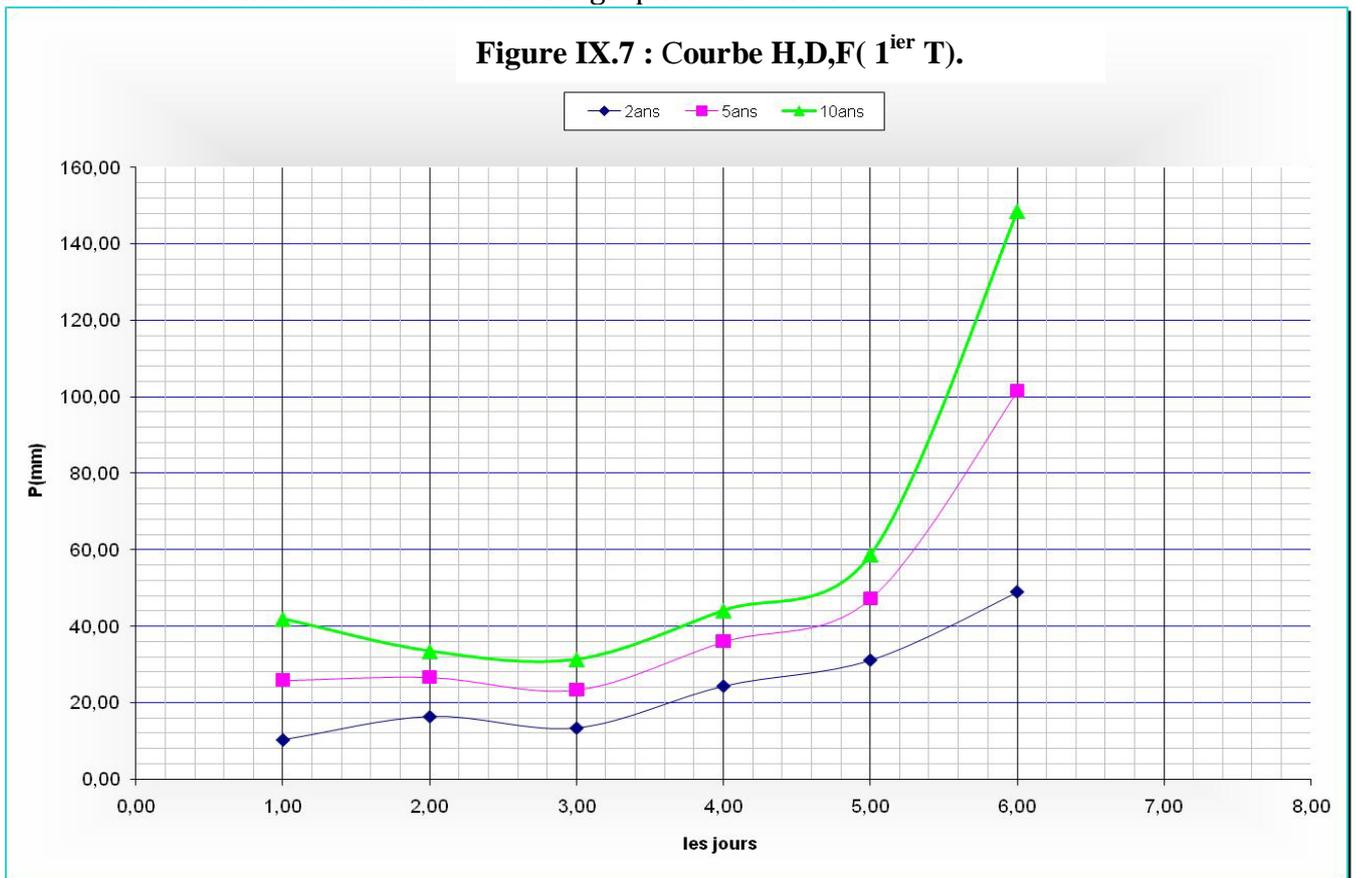


Figure IX.8 : Courbe H,D,F(2^{ième} T).

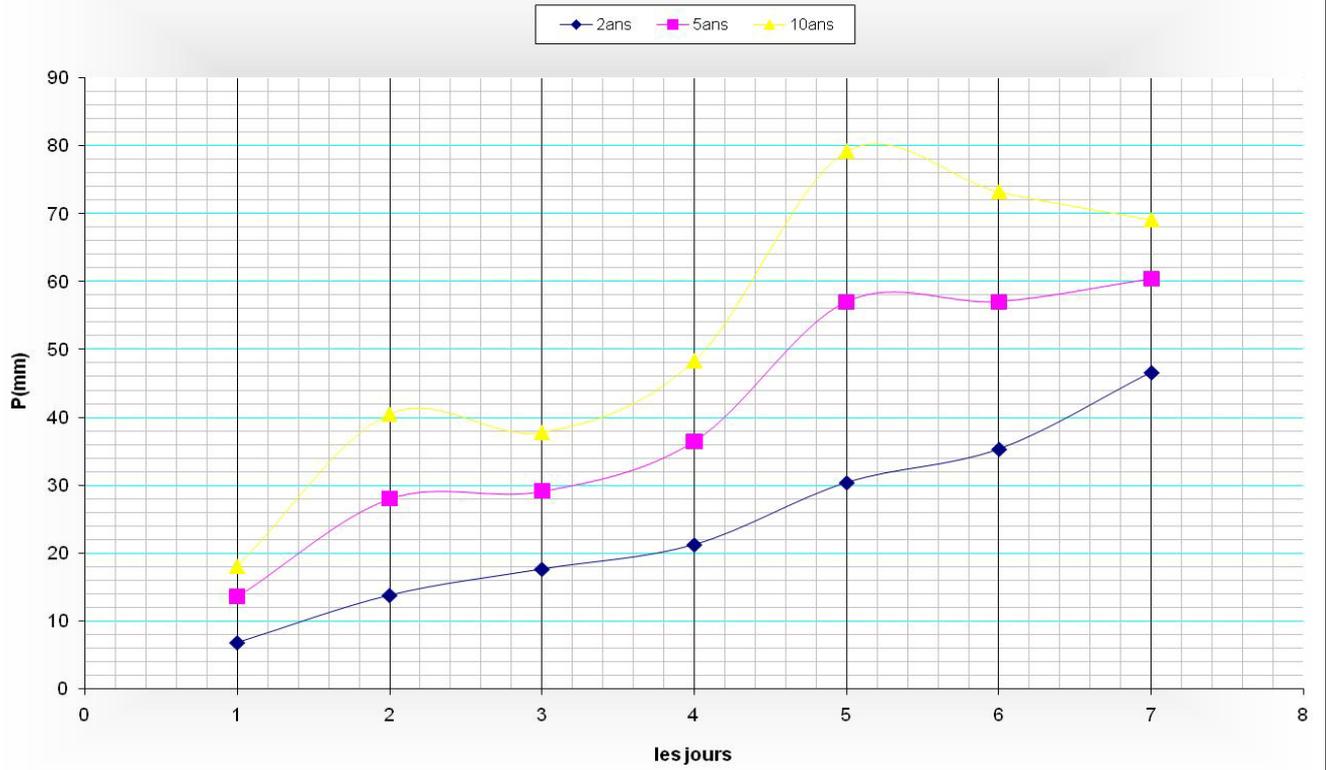
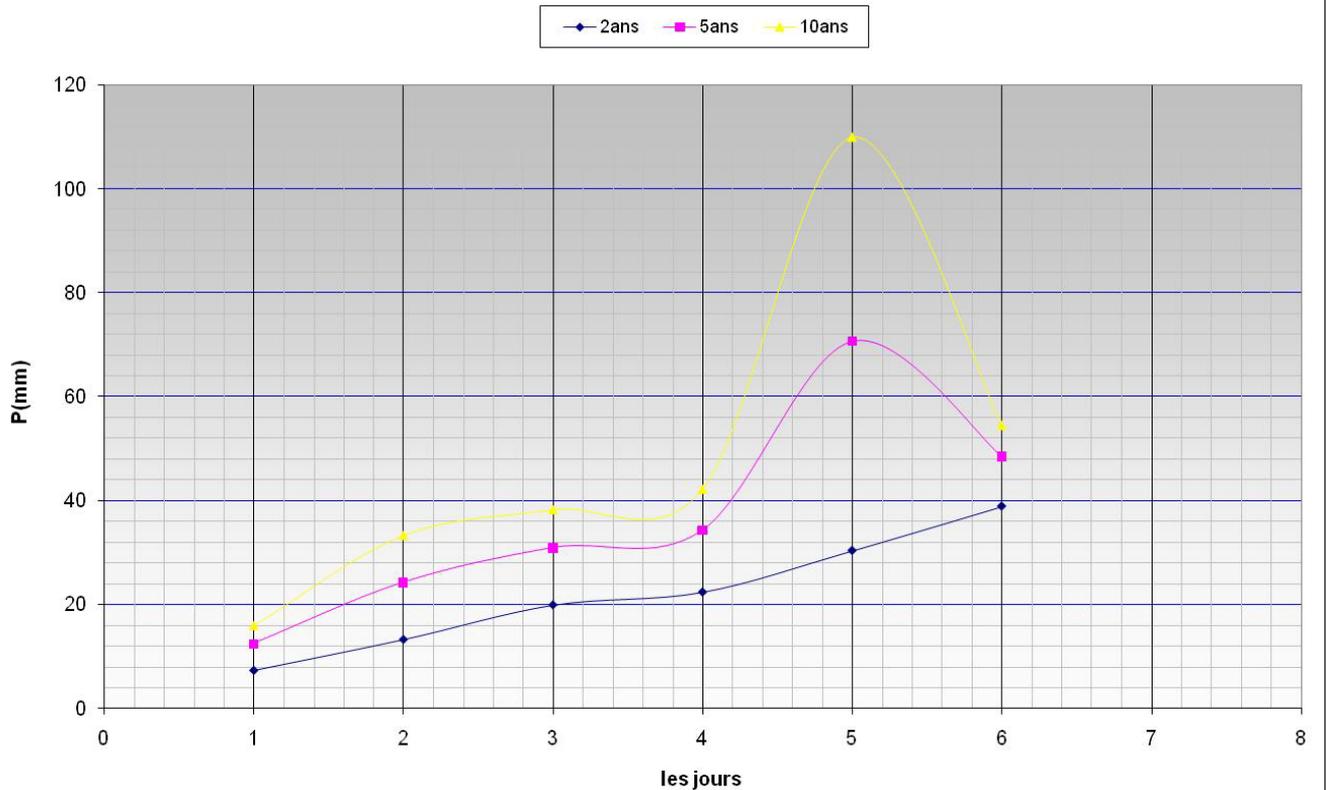


Figure IX.9 : Courbe H,D,F(3^{ième} T).



Pour tirer la pluie critique du graphe, il faut déterminer les paramètres dépendant.

- Du moment de la submersion.
- Du type de végétation.

Valeurs fréquemment retenues :

- Arborés cultures.....5j.....T = 10ans.
- Maraîchères2j.....T = 5ans.
- Céréales3j.....T = 2ans.

On peut tirer les valeurs des pluies pour chaque type de culture :

Tableaux IX.16 : Valeurs des pluies pour chaque type de culture.

	Arborés cultures	Maraîchères	Céréales
1 ^{er} T	58,77	26,67	13,41
2 ^{ème} T	79,23	27,98	17,64
3 ^{ème} T	109,89	24,27	19,91

Détermination de la pluie critique :

Pour calculer la pluie critique, il faut d’abord déterminer la période sensible à chaque type de culture.

Le tableau suivant résume les valeurs nécessaires au calcul.

Tableaux IX.17 : Valeurs nécessaires au calcul.

Type de culture	Datte du semis	Période nécessaire	Période sensible	Pluie (mm)	Durée
Blé	Nov.	120	Avr.	20	3 jours
Orge	Nov.	120	Fév.	18	
Soja	Mai.	140	Mai.	20	

1- Débit caractéristique en régime permanent sans stockage :

Soit l’intensité de la pluie i_p critique qui tombe en une durée θ jours. On suppose que la fraction de la pluie à drainer par le réseau est la somme de ruissellement et de l’infiltration ($r+i=1- e$).

Tableaux IX.18 : Pluies critiques de chaque culture.

Type de culture	Datte du semis	Période nécessaire	Période sensible	pluie (mm)	Intensité de la pluie (mm/h)	Débit caractéristique (l/s/ha)
Blé	Nov.	120	Avr.	20	0,28	0,50
Orge	Nov.	120	Fév.	18	0,25	0,45
Soja	Mai.	140	Mai.	20	0,28	0,50

Calcul du débit caractéristique en régime permanent avec stockage :

Selon les chapitres précédents, on obtient les résultats suivants :

Tableaux IX.19 : Calcul du débit caractéristique en régime permanent avec stockage.

Type de culture.	Date du semis.	Période nécessaire.	Période sensible.	p (mm/j)	Texture	Évapo-transpiration (mm/j)	(h=mm)		200,00	200,00	300,00	400,00
							Porosité	a=7%	al=8,5%	la=11%	als=17%	e=20%
blé	nov.	120,00	Avr.	6,67	a/al/la/e	6,87	-14,20	-17,20	-22,20			-80,20
orge	nov.	120,00	Fev.	6,00	la/al/als/e	4,88		-15,88	-20,88	-49,88		-78,88
soja	mai	140,00	Mais	6,67	a/al	8,31	-15,64	-18,64				

Avec :

- a:..... Argile.
- al : Argilo-limoneux.
- la : Limono-argileux.
- als : Argilo-limono-sableux.
- e : Equilibré.

Selon ce tableau, on remarque que la pluie est très petite devant la somme de l'évaporation et du stockage du sol. On ne peut pas calculer le débit caractéristique en régime permanent avec stockage à cause des résultats négatifs, ce qui traduit une région semi-aride ne convenant pas à ce type du drainage (drainage en régime variable).

1- En régime variable :

Dans les régions où le climat impose un régime variable (averses de grande intensités) avec des périodes inter pluviales assez longues, le calcul du débit est en fonction de la capacité du stockage. Le rôle du réseau du drainage en régime variable est de rabattre le niveau de la nappe au niveau initial dans un délai déterminé θ , et donc le débit est donné par:

$$q_c = \frac{S}{\theta} \quad [\text{mm/j}] \quad \text{-----} \quad q_c = \frac{S}{\theta} \cdot \frac{1}{8,64} \quad [l/s/ha]$$

$s = \Delta H = \Delta h * u\%$

ΔH : S: Stockage.

Δh : Variation de la charge dans le sol.

$U\%$: Porosité efficace.

Pour déterminer la variation de charge ΔH , il faut d'abord déterminer la charge au-dessus des drains et les profondeurs optimales qui correspondent aux différentes plantes.

Le tableau suivant résume les profondeurs optimales en fonction des plantes.

Tableaux IX.20 : Profondeur optimale.

Type de culture	Profondeur optimale en fonction du sol (m).		Charge au-dessus du drain hc (m).		Profondeur du drain (m).	
	a/al/la/	als/e	a/al/la	als/e	a/al/la	als/e
Blé	0,9	1,2	0,4	0,5	1,4	1,8
Orge						
Soja						

Calcul du débit caractéristique du drainage en cas d'excès d'eau provenant de l'irrigation. Puisque ces cultures sont des céréalières qui n'ont pas besoin de grande quantité d'eau d'irrigation, alors devant la précipitation, on peut négliger l'excès d'eau provenant de l'irrigation.

Le tableau suivant représente les valeurs de l'écartement obtenues à partir de notre logiciel de calcul.

Tableaux IX.21 : Valeurs de l'écartement obtenues à partir de notre logiciel de calcul :

Sous zone	Type du sol	Type de culture	Débit caractéristique en régime permanent sans stockage (mm/j)	Débit caractéristique en régime variable sans stockage (mm/j)	Profondeur d'horizon (cm)	Profondeur optimale (cm)	Lame à drainer (mm)	k m/j	formules	Ecartement des drains (m)	k _{eq}
											m/j
A1	A	Blé	4,32		Infinie	90	9,5	0,61	2h	85	1,66
	AL	Orge		7,06	80	90	21,18	1,73	v	100	
	LA	Blé	4,32		40	90	12,12	2,6	3h	100	
A2	A	Soja	4,32		Infinie	90	9,5	0,61	2h	85	1,66
	AL	Orge		7,06	100	90	21,18	1,73	v	150	
	LA	Blé	4,32		60	90	12,12	2,6	3h	100	3,61
	ALS	Orge		5,88	90	120	17,65	3,89	v	200	

Avec :

Abréviations	Formules
2h.....	2 ^{ème} formule de : Hooghoudt
3h.....	3 ^{ème} formule de : Hooghoudt
v.....	Formule de : Glover Dumm

Après cette application, on conclut que notre logiciel fonctionne bien et donne de bons résultats par rapport aux exemples des livres (Land drainage, Drainage principal,...etc.) et aux autres exemples.

Conclusion

Au terme de ce travail, il apparait que l'élaboration d'un programme de calcul reste concevable à notre niveau. C'est là qu'il est au préalable de bien cerner l'ensemble des facteurs et critères du dimensionnement qui varient comme nous l'avons dit dans notre travail, en fonction des climats, des sols, et des cultures. Ceci forme une banque de donnée très importante qu'il faut prévoir exploiter aisément.

Nous avons donc créé des fichiers aux macros complémentaires pour chaque paramètre nécessaire au calcul du réseau, facilitant ainsi à l'utilisateur ou projeteur l'accès facile à ces données.

La seule connaissance de la pluviométrie, de la qualité de l'eau et du sol, et le type de culture aide à la projection du réseau, ceci a été confirmé par l'application de notre exemple.

Notre travail peut comporter des erreurs ce que nous espérons minimales ou corrigible dans le futur.

Références bibliographiques

- 1- **A. Phocaidès** .- manuel des techniques d'irrigation sous pression :2^{ème}ed .-2008.
- 2- **A.mermoud** .- Irrigation basique (notions fondamentales d'irrigations.-mars-2006
- 3- **A.mermoud** .- Maitrise de la salinité des sols.- janvier-2006
- 4- **Béninatouaibia**.- Manuel pratique d'hydrologie.-mars 2004
- 5- **A Bruand et Y Coquet**.- Les sols et le cycle de l'eau.-CNRS-ISTO – UMR6113 a, rue de la Ferralerie – 45071 Orléans Cedex 2
- 6- **Christophe Darmangeat**.-INTRODUCTION A L'ALGORITHMIQUE
- 7- **H.P.Ritzema**.- Drainage principales and application (-1994)
- 8- **Isabelle Couture**.- ANALYSE D'EAU POUR FIN D'IRRIGATION.-2003-2004
- 9- **J.P. Montoroi**.-Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol : Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal).-août 1996
- 10- **Jacques Bonvin**.- Hydraulique urbaine
- 11- **Jean de Bremond d'Ars**.- .Le cycle de l'eau
- 12- **Jean-robert tiercelin. Alain vidal**.-Traité d'irrigation .- 2 édition 2006
- 13- **jean-yvesloyer**.-salinité des eaux d'irrigation problèmes et solutions.-Italie, 25-26 juillet 1991
- 14- **Lambert K.Smedema**.- Land drainage .-1983
- 15- **Mikael bidault**.- Le programmeur EXCEL & VBA XP
- 16- **Poirée et Ollier**.-drainage et assainissement agricole
- 17- **Raymond Bernier ingénieurMAPAQOutaouais**.-Ce que vous devez savoir sur le drainage agricole
- 18- **T. Hartani,L,Zella**.- le drainage agricole .-ENASA,1997
- 19- **V. VALLES, F. BOURGEAT, M. GUIRESSE**.- Calcul des doses d'irrigation pour les sols salés Application d'une méthode géochimique de calcul à un sol TUNISIEN (Laboratoire de Pédologie/Aménagement E.N.S.A.T., 145, av. de Muret, 31076)
- 20- **Victor Savoie,ing,agr** .- les principales causes d'un mouvaise drainage de surface .:- diagnostic et corerction.-2005
- 21- **Xanthoulis Dimitri**.- Physique du sol

Sitographie :

(www.globe-swiss.ch)

Articles :

Organigramme de programmation.-(Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.)

Annexe A

Annexe A

2. COEFFICIENTS CULTURAUX (Kc)

CULTURE	Stades de développement de la culture					Durée totale de la période végétative
	Initial	Développement	Mi-saison	Arrière saison	Récolte	
Bananier						
tropical	0.4-0.5	0.7-0.85	1.0-1.1	0.9-1.0	0.75-0.85	0.7-0.8
subtropical	0.5-0.65	0.8-0.9	1.0-1.2	1.0-1.15	1.0-1.15	0.85-0.95
Haricot						
vert	0.3-0.4	0.65-0.75	0.95-1.05	0.9-0.95	0.85-0.95	0.85-0.9
sec	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.25-0.3	0.7-0.8
Chou	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.1	0.9-1.0	0.8-0.95	0.7-0.8
Coton	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.25	0.8-0.9	0.65-0.7	0.8-0.9
Raisin	0.35-0.55	0.6-0.8	0.7-0.9	0.6-0.8	0.55-0.7	0.55-0.75
Arachide	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.1	0.75-0.85	0.55-0.6	0.75-0.8
Mais						
doux	0.3-0.5	0.7-0.9	1.05-1.2	1.0-1.15	0.95-1.1	0.8-0.95
grain	0.3-0.5*	0.7-0.85*	1.05-1.2*	0.8-0.95	0.55-0.6*	0.75-0.9*
Oignon						
sec	0.4-0.6	0.7-0.8	0.95-1.1	0.85-0.9	0.75-0.85	0.8-0.9
vert	0.4-0.6	0.6-0.75	0.95-1.05	0.95-1.05	0.95-1.05	0.65-0.8
Pois, frais	0.4-0.5	0.7-0.85	1.05-1.2	1.0-1.15	0.95-1.1	0.8-0.95
Poivron, frais	0.3-0.4	0.6-0.75	0.95-1.1	0.85-1.0	0.8-0.9	0.7-0.8
Pomme de terre	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.2	0.85-0.95	0.7-0.75	0.75-0.9
Riz	1.1-1.15	1.1-1.5	1.1-1.3	0.95-1.05	0.95-1.05	1.05-1.2
Carthame	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.7	0.2-0.25	0.65-0.7
Sorgho	0.3-0.4	0.7-0.75	1.0-1.15	0.75-0.8	0.5-0.55	0.75-0.85
Soja	0.3-0.4	0.7-0.8	1.0-1.15	0.7-0.8	0.4-0.5	0.75-0.9
Betterave sucrière	0.4-0.5	0.75-0.85	1.05-1.2	0.9-1.0	0.6-0.7	0.8-0.9
Canne à sucre	0.4-0.5	0.7-1.0	1.0-1.3	0.75-0.8	0.5-0.6	0.85-1.05
Tournesol	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.7-0.8	0.35-0.45	0.75-0.85
Tabac	0.3-0.4	0.7-0.8	1.0-1.2	0.9-1.0	0.75-0.85	0.85-0.95
Tomate	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.25	0.8-0.95	0.6-0.65	0.75-0.9
Pastèque	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.05	0.8-0.9	0.65-0.75	0.75-0.85
Blé	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.2-0.25	0.8-0.9
Luzerne	0.3-0.4				1.05-1.2	0.85-1.05
Agrumes sarclés sans sarclage						0.65-0.75 0.85-0.9
Olivier						0.4-0.6

Premier chiffre : avec forte humidité (HRmin > 70%) et vent faible (U < 5 m/sec).
Second chiffre : avec faible humidité (HRmin < 20%) et vent fort (> 5 m/sec).

Source: Bulletin FAO d'Irrigation et Drainage n° 33, Tableau 18.

Annexe A

Type de sol	K conductivité hydraulique		unité
	min	max	
Sable moyenne	1	5	m/j
Sablo-limoneux et sable fin	1	3	
Limoneux et argilo-limoneux a bon structure	0.5	2	
Sable fin et limon	0.2	0.5	
Argilo-limoneux et argileux a mauvaise structure	0.02	0.2	
Très argileux		<0.02	

Annexe A

table de tolérance des cultures par rapport a la salinité totale en relation avec (chut de rendement, bossions de lessivage, salinité de l'eau)

chut de(r)	culture	0%			10%			25%			50%			Cedw max
		Cees	Ceiw	lr	Cees	Ceiw	lr	Cees	Ceiw	lr	Cees	Ceiw	lr	
1														
2	orge	8	5,3	10	10	6,7	12	13	8,7	15	18	12	21	56
3	coton	7,7	5,1	10	9,6	6,4	12	13	8,3	15	17	12	21	54
4	blé	6	4	10	7,4	4,9	12	9,5	6,4	16	13	8,7	22	40
5	soja	5	3,3	17	5,5	3,7	18	6,2	4,2	21	7,5	5	25	20
6	sorgho	4	2,7	7	5,1	3,4	9	7,2	4,8	13	11	7,2	20	36
7	maïs	1,7	1,1	6	2,5	1,7	8	3,8	2,5	13	5,8	3,9	20	20
8	fève	1,6	1,1	4	2,6	1,8	7	4,2	2	12	6,8	4,5	19	24
9	pois	1,3	0,9	5	2	1,3	8	3,1	2,1	12	4,9	3,2	19	17
10	haricot	1	0,7	5	1,5	1	8	2,3	1,5	12	3,6	2,4	19	13
11	palmier daté	4	2,7	4	6,8	4,5	7	10,9	7,3	11	17,9	12	19	64
12	figuier	2,7	1,8	6	3,8	2,6	9	5,5	3,7	13	8,4	5,6	20	28
13	olivier													
14	orange citron	1,7	1,1	7	2,3	1,6	10	3,3	2,2	14	4,8	3,2	20	16
15	pommier	1,7	1	6	2,3	1,6	10	3,3	2,2	14	4,8	3,2	20	16
16	noyer													
17	abricot	1,6	1,1	9	2	1,3	11	2,6	1,8	15	3,7	2,5	20	12
18	luzerne	2	1,3	4	3,4	2,2	7	5,4	3,6	12	8,8	5,9	19	31
19	vigne	1,5	1	4	2,5	1,7	7	4,1	2,7	11	6,7	4,5	19	24
20	amandier	1,5	1	7	2	1,4	10	2,8	1,9	13	4,1	2,7	20	14
21	prunier	1,5	1	7	2,1	1,4	10	2,9	1,9	14	4,3	2,8	20	14
22	framboisier	1	0,7	6	1,4	1	9	2,1	1,4	13	3,2	2,1	19	11
23	betterave	4	2,7	9	5,1	3,4	11	6,8	4,5	15	9,6	6,4	21	30
24	tomate	2,5	1,7	7	3,5	2,3	9	5	3,4	13	7,6	5	20	25
25	concombre	2,5	1,7	8	3,3	2,2	11	4,4	2,9	15	6,3	4,2	21	20
26	cantaloup	2,2	1,5	5	3,6	2,4	7	5,7	3,8	12	9,1	6,1	19	32
27	épinards	2	1,3	4	3,3	2,2	7	5,3	3,5	12	8,6	5,7	19	24
28	chou	1,8	1,2	5	2,8	1,9	8,9	4,4	2,9	12	7	4,6	19	24
29	pomme de terre	1,7	1,1	6	2,5	1,7	8	3,8	2,5	13	5,9	3,9	20	20
30	maïs doux													
31	patate douce	1,5	1	5	2,4	1,6	8	3,8	2,5	12	6	4	19	21
32	poivre	1,5	1	6	2,2	1,5	9	3,3	2,2	13	5,1	3,4	20	17
33	laitue	1,3	0,9	5	2,1	1,4	8	3,2	2,1	12	5,2	3,4	19	18
34	radis	1,2	0,8	4	2	1,3	7	3,1	2,1	12	5	3,4	19	18
35	oignons	1,2	0,8	5	1,8	1,2	8	2,8	1,8	12	4,3	2,9	19	15
36	carotte	1	0,7	4	1,7	1,1	7	2,8	1,9	12	4,6	3,1	19	16
37	haricot	1	0,7	6	1,5	1	8	2,3	1,5	12	3,6	2,4	19	12,5

5. RESERVE D'HUMIDITE FACILEMENT UTILISABLE (RFU)

DONNEES GENERALES SUR LA PROFONDEUR D'ENRACINEMENT DES CULTURES EN PHASE DE PLEIN DEVELOPPEMENT, FRACTION DE L'EAU UTILISABLE (p) ET RESERVE FACILEMENT UTILISABLE (p.Sa) POUR DIFFERENTS TYPES DE SOLS (en mm/m de profondeur) QUAND $ET_{cult} = 5-6$ mm/jour

Culture	Profondeur d'enracinement (d) m	Fraction (p) de l'eau utilisable ¹	Réserve d'eau facilement utilisable (p.Sa) mm/m ¹		
			T.fin	T.moyenne	T.grossière
Luzerne	1.0-2.0	0.55	110	75	35
Banane	0.5-0.9	0.35	70	50	20
Orge ²	1.0-1.5	0.55	110	75	35
Haricot ²	0.5-0.7	0.45	90	65	30
Betterave	0.6-1.0	0.5	100	70	35
Chou	0.4-0.5	0.45	90	65	30
Carotte	0.5-1.0	0.35	70	50	20
Céleri	0.3-0.5	0.2	40	25	10
Agrumes	1.2-1.5	0.5	100	70	30
Trèfle	0.6-0.9	0.35	70	50	20
Cacao		0.2	40	30	15
Coton	1.0-1.7	0.65	130	90	40
Concombre	0.7-1.2	0.5	100	70	30
Datte	1.5-2.5	0.5	100	70	30
Fruitiers cadu.	1.0-2.0	0.5	100	70	30
Lin ²	1.0-1.5	0.5	100	70	30
Céréales ²	0.9-1.5	0.6	120	80	40
Céré. d'hiver ²	1.5-2.0	0.6	120	80	40
Vigne	1.0-2.0	0.35	70	50	20
Gazon	0.5-1.5	0.5	100	70	30
Arachide	0.5-1.0	0.4	80	55	25
Laitue	0.3-0.5	0.3	60	40	20
Maïs ²	1.0-1.7	0.6	120	80	40
Maïs-ensilage		0.5	100	70	30
Melon	1.0-1.5	0.35	70	50	25
Olivier	1.2-1.7	0.65	130	95	45
Oignons	0.3-0.5	0.25	50	35	15
Palmier	0.7-1.1	0.65	130	90	40
Pois	0.6-1.0	0.35	70	50	25
Poivron	0.5-1.0	0.25	50	35	15
Ananas	0.3-0.6	0.5	100	65	30
Pomme de terre	0.4-0.6	0.25	50	30	15
Carthame ²	1.0-2.0	0.6	120	80	40
Sisal	0.5-1.0	0.8	155	110	50
Sorgho ²	1.0-2.0	0.55	110	75	35
Soja	0.6-1.3	0.5	100	75	35
Epinard	0.3-0.5	0.2	40	30	15
Fraisier	0.2-0.3	0.15	30	20	10
Betterave suc.	0.7-1.2	0.5	100	70	30
Canne à sucre ²	1.2-2.0	0.65	130	90	40
Tournesol ²	0.8-1.5	0.45	90	60	30
Patate douce	1.0-1.5	0.65	130	90	40
Tabac - init.	0.5-1.0	0.35	70	50	25
tard		0.65	130	90	40
Tomate	0.7-1.5	0.4	180	60	25
Légumes	0.3-0.6	0.2	40	30	15
Blé	1.0-1.5	0.55	105	70	35
maturité		0.9	180	130	55
Volume total d'eau du sol disponible (Sa) (mm/m)			200	140	60

¹ Quand $ET_{cult} < 3$ mm/jour, augmenter les valeurs de 30 % ; quand $ET_{cult} > 8$ mm/jour, réduire les valeurs de 30 %. Ceci suppose des conditions non salines ($CE < 2$ dS/m).

² Des valeurs supérieures à celles indiquées ici sont observées durant la maturation.

Sources: Taylor (1965), Stuart et Hagan (1972), Salter et Goode (1967), Rijtema (1965), etc.

Annexe A

1. DUREE DES PHASES DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES

Culture	Init.	Dével	Mi	Arrière	Total	Date Plant	Région
Arachide	25 35	35 45	45 35	25 25	130 140	Saison sèche Mai/Juin	Afrique de l'Ouest Méditerranéen
Artichaud	40 20	40 40	250 220	30 30	360 310	Avr (1 an) Mai (2 yr)	Californie (couper en mai)
Aubergine	30 30	40 45	40 40	20 25	130 140	Octobre Mai/Juin	Régions arides Méditerranéen
Betterave	15 25	25 30	20 25	10 10	70 90	Avr/Mai Fév/Mars	Méditerranéen Méditerr. & R. Arides
Betterave sucrière	45 25 35	75 35 60	80 50 70	30 50 40	230 160 205	Novembre Mai Novembre	Méditerranéen Méditerranéen Régions arides
Blé/Orge	15 20 15	25 25 30	50 60 65	30 30 40	120 135 150	Novembre Mars/Avril Juillet	Inde (Centrale) 35-45 °Lat Afrique de l'Est
Blé d'hiver	30	140	40	30	240	Novembre	Méditerranéen
Carotte	20 30	30 40	50/30 60	20 20	100 150	Oct/Jan Fév/Mars	Climats arides Méditerranéen
Carthame	20 35	35 55	45 60	25 40	125 190	Avril Oct/Nov	Californie, USA Régions arides
Céleri	25 25	40 40	95 45	20 15	180 125	Oct Avril	Climats (semi)-arides Méditerranéen
Céréales	20 25	30 35	60 65	40 40	150 165	Avril Oct/Nov	Méditerranéen Pakistan; Rég. arides
Citrouille	20 25	30 35	30 35	20 25	100 120	Mars, Août Juin	Méditerranéen Europe
Concombre	20 25	30 35	40 50	15 20	105 130	Juin/Août Nov; Fév	Régions arides Régions arides
Coton	30 30 30	50 50 50	60 60 55	55 55 45	195 195 180	Mars;Avr/Mai Sept Avril	Egypte; Pakistan Yemen Texas
Courgette	25 20	35 30	25 25	15 15	100 90	Avril Mai/Juin	Médit.; R. Arides Médit.; Europe
Crucifères	20 25 30	30 35 35	20 25 90	10 10 40	80 95 195	Avril Février Oct/Nov	Méditerranéen Méditerranéen Méditerranéen
Epinard	20 20	20 30	25 40	5 10	70 100	Avr; Sep/Oct Novembre	Méditerranéen Régions arides
Haricots (sec)	20 15	30 25	40 35/50	20 20	110 95	Mai/Juin Juin	Climats Continental Pakistan, Calif.
Haricot (vert)	20 15	30 25	30 25	10 10	90 75	Fév/Mars Août/Sep	Calif., Méditerranéen Calif., Egypte, Liban
Laitue	20 30 25	30 40 35	15 25 30	10 10 10	75 105 100	Avril Nov/Jan Oct/Nov	Méditerranéen Méditerranéen Régions arides
Lentille	20 25	30 35	60 70	40 40	150 170	Avril Oct/Nov	Europe Régions arides

Suite Annexe A

Culture	Init.	Dével	Mi	Arrière	Total	Date Plant	Région
Lin	25	35	50	40	150	Avril	Europe Arizona
	30	40	100	50	220	Octobre	
Maïs (doux)	20	20	30	10	80	Mars	Philippines Méditerranéen Climats arides
	20	25	25	10	80	Mai/Juin	
	20	30	50/30	10	90	Oct/Déc	
Maïs (grain)	30	50	60	40	180	Avril	Afrique de l'Est (alt.) Climats arides Nigeria (humide) Inde (sec, froid) Spain (spring, sum.)
	25	40	45	30	140	Déc/Jan	
	20	35	40	30	125	Juin	
	20	35	40	30	125	Octobre	
	30	40	50	30	150	Avril	
Melon	25	35	40	20	120	Mai	Méditerranéen Régions arides
	30	45	65	20	160	Déc/Jan	
Mil	15	25	40	25	105	Juin	Pakistan USA (centre)
	20	30	55	35	140	Avril	
Oignon (sec)	15	25	70	40	150	Avril	Méditerranéen Régions arides
	20	35	110	45	210	Octobre	
Oignon (vert)	25	30	10	5	70	Avril/Mai	Méditerranéen Régions arides
	20	45	20	10	95	Octobre	
Pois	15	25	35	15	90	Mai	Europe Méditerranéen
	20	30	35	15	100	Mars/Avril	
Poivron	25/30	35	40	20	125	Avril/Juin	Europe & Méditerr. Régions arides
	30	40	110	30	210	Octobre	
Pomme de terre	25	30	30/45	30	115/130	Jan/Nov	Climats (semi)-arides Climat Continental Europe
	25	30	45	30	130	Mai	
	30+15	35	50	30	145	Avril	
Radis	10	10	15	5	40	Mars/Avril	Méditerr.; Europe Régions arides
	10	10	15	5	40	Hiver	
Ricin	25	40	65	50	180	Mars	Climats (semi)-arides
Soja (fève)	20	30/35	60	25	140	Mai	USA (Centre) Japon
	20	25	75	30	150	Juin	
Sorgho	20	35	40	30	130	Mai/Juin	USA, Pakis., Méd. Régions arides
	20	35	45	30	140	Mars/Avril	
Tomate	30	40	40	25	135	Janvier	Régions arides Régions arides Méditerranéen
	35	45	70	30	180	Oct/Nov	
	30	40	45	30	145	Avril/Mai	
Tournesol	25	35	45	25	130	Avril/Mai	Médit.; Californie

Source: Bulletin FAO d'Irrigation et Drainage n° 24, Tableau 22.

Annexe A

A- dommage subis par les plantes (en % de la récolte optimale) en cas d'une submersion de 3,7,11,ou15 jours

Mois	déc.				janv.				fév.				mars				avril				mai			
nombre de jour de submersion	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15
fourrage pérennes			5	10			5	10			5	10			10	20	10	25	40	60	10	30	50	100
pâturage																10		10	20	30		15	30	50
Prairie																10		10	20	30		15	30	50
betterave a sucre (lourragère)													10	50	100	100	10	50	90	100	10	50	90	100
pomme de terre													30	50	100	100	30	80	100	100	40	90	100	100
tournesol																	10	20	40	80	10	30	60	100
chaovre																	20	40	60	100	20	50	75	100
céréales d'aulomne		5	10	20		5	10	15		5	10	20	5	15	30	50	10	25	50	70	20	40	70	100
céréales dn puinomps													10	20	40	100	15	40	75	100	15	50	75	100
Mais																	20	80	100	100	10	50	80	100

Mois	juin				juil.				aout				septembre				octobre				novembre			
nombre de jour de submersion	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15
fourrage pérennes	10	40	70	100	10	40	70	100	10	30	50	80	10	30	50	70		10	20	30			5	10
Pâturage		20	30	50		20	30	50		10	20	30				10								
Prairie		20	30	50		20	30	50		10	20	30				10								
betterave a sucre (lourragère)	10	40	90	100	10	40	90	100	10	40	90	100	10	40	90	100		10	30	50				
pomme de terre	50	100	100	100	50	100	100	100	50	100	100	100	20	40	60	80								
Tournesol	10	40	80	100	10	40	60	80		10	30	50												
Chaovre	10	40	60	80	10	30	50	70			10	20												
céréales d'aulomne	20	50	80	100			10	20													4	10	20	
céréales dn puinomps	20	50	75	100			10	20																
Mais	10	40	75	100		10	50	80		10	40	60		10	20	30			10	10				

Annexe A

A- la profondeur optimale de la nappe en fonction de type de sol :

culture	sols fin perméable	sol grossiers	sols moyens
culture de plan champ			
R,P	1,2	1	1,4
R,V	0,9	0,9	1,2
maraichage			
R,P	1,1	1	1,3
R,V	0,9	0,9	1,1
vergers			
R,P	1,6	1,2	1,6
R,V	1,4	1,1	1,4

La perméabilité des différentes types des sols :

texture	type de sol	K(m/j)
tres fine	argileuse	<0,1
fine	argilo-limoneuse	0,1-0,3
	limono-argileuse	
	argilo-sableuse	
moyene	limoneus	0,3-0,6
	sablo-limoneuse	
grossiere	limono-sableuse	0,6-1
	sablo-limoneuse	
trs grossier	sableuse	>1

porosité totale en fonction de type de sol :

type de sol	da	dr	P%
sablo humifères	0,75	2,6	47
argileux	1,4-1,6	2,6	40
limon	1,2-1,25	2,4	34
sols sableux	1,3-1,4	2,7	39

La porosité efficace :

porosité efficace		
texture	min	max
argile	5	10
limon	10	15
sable	30	