

المملكة المغربية

ROYAUME DU MAROC

INSTITUT AGRONOMIQUE
ET VÉTÉRINAIRE HASSAN II



معهد الحسن الثاني
للزراعة والبيطرة

Projet de Fin d'Etudes présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Rural

Option : Irrigation, Gestion de l'Eau et Environnement

**Essais d'infiltration en vue de la contribution à
l'amélioration de l'efficacité des canaux d'irrigation
dans la Petite et Moyenne Hydraulique dans la région de
Meknès-Tafilalet (cas de Jorf-Erfoud)**

Présenté et soutenu publiquement par

Mlle NGOM Awa

Devant le jury composé de :

Pr. A. HAMMANI	Président	DEEI/IAV Hassan II
Pr. M. BAKACHE	Rapporteur	DEEI/IAV Hassan II
Pr. R. BOURZIZA	Examinatrice	DEEI/IAV Hassan II
Pr. M. NAIMI	Examineur	DRNE/IAV Hassan II

Juillet 2015

Remerciements

Je rends grâce à Dieu, le Clément, le Miséricordieux, le Tout Puissant de nous avoir donné la santé, la paix pour réaliser ce travail.

Je tenais à remercier toute les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement à :

Pr. BAKACHE Mohamed mon cher encadrant pour sa disponibilité, l'énergie et tous les moyens qu'il a mis à ma disposition tout au long de ce travail. Je ne le remercierai jamais assez pour ses conseils, ses orientations constructives. Ses qualités personnelles marquées par un optimisme inébranlable m'ont beaucoup instruit.

Pr. Ali HAMMANI, qui a bien voulu m'honorer de sa présence et présider ce jury. Je le remercie très chaleureusement pour ses conseils et ses suggestions pertinentes.

Pr. NAIMI M. et **Pr. BOURZIZA R.** de m'avoir honoré de leur présence et examiner ce travail.

Egalement le corps professoral et l'ensemble du personnel du département du Génie Rural (Eau Environnement et Infrastructure).

Mes remerciements les plus sincères s'adressent spécialement à toute ma famille et mes amis pour leur soutien, leur prière et leur participation directe ou indirecte à ma réussite.

Merci du fond du cœur !!!

Dédicaces

A mes très chers parents

Les mots ne sauraient traduire tout l'amour que j'ai pour vous et cette page ne suffirait pas pour vous exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance. Tant d'années d'amour de sacrifice et de labour ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

A mes frères mes sœurs et mes cousins

Je vous dédie ce travail. Votre soutien, votre présence et vos prières m'ont accompagné toutes ces années

Aux membres du Dahira Fathul Ghaffar Section Rabat

Grace à vous j'ai vécu mes plus belles années de ma vie au service de Kou Tedd Ki CHEIKH AHMADOU BAMBA KHADIM RASSOUL. Vous avez changé ma vie en y apportant la paix, l'amour, la spiritualité. Je n'ai même pas les mots pour vous exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance.

A la communauté sénégalaise de l'IAV

Toutes les promos confondus à mes promotionnaires jusqu'aux apésistes. Mention spéciale à mes adorables anciens et anciennes. Votre soutien me va droit au cœur.

Aux *Nig10* la plus belle promo de tout l'IAV plus particulièrement à *MENDY Elizabeth* avec qui j'ai partagé mes sauts d'humeur tous ces 5 années.

A tous mes très chers amis du Sénégal et du Maroc

A tous ceux qui ont cru en moi, m'ont fait confiance, à ceux qui me sont chers, à ceux qui m'aiment.

Je vous aime. Qu'ALLAH vous bénisse vous protège et vous accorde sa Miséricorde !!!

DIEUREUDIEUF SERIGNE TOUBA DIARAMA MAME CHEIKH IBRAHIMA FALL

Résumé

Les canaux en terre connaissent d'importantes pertes d'eau due à l'infiltration. Ainsi la faible efficacité de ces canaux d'irrigation présente un sérieux problème que l'Etat et les AUEA tentent de dépasser. Cependant, pour atteindre les objectifs du plan national d'économie d'eau PNEE surtout dans les périmètres de la PMH, l'amélioration de l'efficacité des canaux en terre pour l'irrigation devient nécessaire.

Notre travail a porté sur des expérimentations pour l'amélioration de l'efficacité des canaux en terre dans le périmètre de Jorf-Erfoud. Les essais de laboratoire qui ont été réalisés, ont concerné trois séguia : Lgdima, Hanabou et Lhart Jdid. Ces séguia, grâce aux analyses granulométriques réalisées, présentent presque les mêmes textures avec des pourcentages d'éléments fins différents. Ces échantillons séchés, sont mélangés avec plusieurs pourcentages d'argile 5% , 10%, 15%, 20% et 25% avec différents teneurs en eau 0%, 5% et 10% pour chaque séguia. Dans certaines expériences, on a étudié l'effet du mélange à la paille sur l'infiltration. Au total 58 essais ont été réalisés pour connaître et cerner l'influence de l'argile, de la paille et de l'humidité sur l'infiltration et le taux d'infiltration.

Pour l'analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima seul à sec nous avons enregistré 43min pour l'échantillon de Lgdima sans compactage et de 101min avec compactage avec une différence de 58min. Ce temps est compris entre 165min pour l'ajout de 5% d'argile, 310min pour 10% d'argile, 499min pour 15% d'argile, 1685min pour 20% d'argile et 2380 min pour l'ajout de 25% d'argile.

On remarque que le fait de mélanger une portion d'argile au sol d'origine avec une énergie de compactage donnée réduit les pertes par infiltration et le taux de l'infiltration. Cette diminution devient plus importante si on augmente la quantité d'argile ou on y ajoute de la paille avec une certaine teneur en eau. Les résultats sur ces expérimentations pourront contribuer à l'amélioration de l'efficacité des canaux d'irrigation dans les périmètres de la PMH.

Mots clés : PMH, amélioration, efficacité, canaux en terre, perte par infiltration, taux d'infiltration, argile, teneur en eau, paille.

ABSTRACT

Earthen canals are experiencing significant water losses due to seepage. Thus the low efficiency of these irrigation canals is a serious problem that the state and AUEA are trying to overcome. However, to achieve the objectives of the National Plan for Water Economy PNEE especially in the SMH regions, improving earthen canals' efficiency for irrigation becomes necessary.

Our work was basically on experiments to improve the efficiency of earthen canals in the region of Jorf, Erfoud. Laboratory tests that were conducted focused on three seguias: Lgdima, Hanabou and Lhart Jdid. The granulometric analyzes show that these seguias have almost the same textures with different percentages of fine elements. These dried samples were mixed with various percentages of clay 5%, 10%, 15%, 20% and 25% with various water percentages 0%, 5% and 10% for each seguia. In some experiments, we studied the effect of the straw mixture on infiltration. In total 58 experiments were conducted to know and understand the influence of clay, straw and humidity on the infiltration rate.

For the analysis of the infiltration in the sample of Lgdima seguia we registered 43min for the sample of Lgdima without compaction and of 101min with compaction with a difference of 58min. This time is between 165min for the addition of 5 % of clay, 310min for 10 % of clay, 499min for 15 % of clay, 1685min for 20 % of clay and on 2380 min for the addition of 25 % of clay.

It is noted that mixing a portion of clay with the seguia soil sample with a given compaction energy reduces seepage losses and the infiltration rate. This decrease becomes more important if we increase the amount of clay or add some straw with certain water content. The results of these experiments will help improve the efficiency of irrigation canals within the SMH regions.

Key words: SMH, improve, efficiency, earthen canals, seepage losses, infiltration rate, clay, water content, straw.

ملخص

يؤدي استعمال القنوات الترابية الى ضياع كميات مهمة لمياه الري بسبب تسرب هذا الأخير في التربة ،وبالتالي فإن فاعلية هاته القنوات الترابية يشكل مشكلا جديا للدولة و جمعية مستعملي المياه الزراعية، اللتان تحاولان إيجاد حل له وتجاوزه.

من جهة اخرى، تحقيق الأهداف المسطرة في المخطط الوطني لإقتصاد المياه (م. و. ا. م) خصوصا في المدارات الهيدروليكية الصغيرة و المتوسطة (م. ه. ص. م) ، مرتبط بشكل جدي بتحسين فاعلية القنوات الترابية. يركز عملنا على تجارب هدفها تحسين فاعلية القنوات الترابية في المدارات الهيدروليكية جرف ارفود. التجارب المنجزة تتعلق بثلاث قنوات ترابية :الكديمة ، ه نابو ، والحرث الجديد، هاته القنوات حسب تحليلات التربة المنجزة لها نفس الخصائص مع نسب مغايرة للحبيبات الدقيقة.

قمنا بخلط عينات مجففة للتربة كل قناة المجففة مع نسب مختلفة من الطين 5%، 10%، 15%، 20% و 25%، مع محتوى مختلف للمياه 0%، 5%، 10%. في بعض التجارب، قمنا بدراسة تأثير خلط القش مع العينات على تسرب مياه الري.

58 تجربة اجريت لمعرفة تأثير الطين، القش والرطوبة على تسرب المياه و سرعة هذا التسرب

حليل من تسلل في العينة الجاف فقط ثابت .كسر الكديمة سجلنا (تسجيل) 43 دقيقة على عينة من الكديمة دون و تراص و 101 دقيقة مع و تراص بفارق 58 دقيقة هذا الوقت (د) بين 165 دقيقة إضافة 5% من طين 310 دقيقة 10% من طين 499 دقيقة 15% من طين على 1685 دقيقة 20% من الطين على 2380 دقيقة إضافة 25% من الطين

نلاحظ ان خلط نسبة من الطين مع عينات التراب مع اضافة طاقة للضغط، يؤدي الى تخفيض نسبة التسرب، و كلما زادت كمية الطين المستعملة للخلط، مع إضافة القش، تزيد أهمية هذا الانخفاض. و منه فان نتائج هاته التجارب بامكانها ان تساهم في تحسين فاعلية القنوات الترابية للري في المدارات الهيدروليكية الصغيرة و المتوسطة (م. ه. ص. م).

كلمات مفاتيح : المدارات الهيدروليكية الصغيرة و المتوسطة (م. ه. ص. م) ، تحسين الفاعلية ، القنوات الترابية ، ضياع لمياه الري بسبب التسرب،نسبة التسرب، طين، محتوى المياه ،قش.

Table des matières

REMERCIEMENTS	II
DEDICACES	III
RESUME	IV
ملخص.....	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES ABREVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES :	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PROBLEMATIQUE :	2
OBJECTIFS :	2
METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	3
<i>PARTIE I : BIBLIOGRAPHIE</i>	4
Chapitre 1 : la Petite et Moyenne Hydraulique.....	5
Introduction.....	5
I. La situation de la PMH au Maroc	5
II. Caractéristiques de la PMH	6
1. Taille des périmètres de la PMH.....	6
2. Statut foncier :.....	6
3. Ressources en eau	7
4. Les infrastructures hydro-agricoles.....	8
III. Les problèmes rencontrés dans la PMH.....	9
1. Le réseau d'irrigation et les ouvrages : faible efficience	9
2. Les problèmes fonciers	9
3. Droits d'eau.....	10
4. Les problèmes de gestion du réseau et de distribution de l'eau.....	11
IV. Stratégies et programmes de réhabilitation et modernisation des périmètres de la PMH	11
1. Projet de développement rural intégré centré sur la Petite et Moyenne Hydraulique (DRI-PMH).....	11

2. Projet d'aménagement hydro-agricole en PMH dans les provinces du Nord (PMH-NORD)	12
3. Projet d'aménagement hydro-agricole dans la région de Souss-Massa (PMH-III).....	14
4. PMH pour le développement des zones Bour.....	15
5. Programme MEDA de développement rural intégré et gestion des ressources naturelles dans les provinces du Nord (DRI-GRN)	15
6. Programme continu de sauvegarde des périmètres de PMH	15
7. Extension de la PMH – Périmètre SAHLA	17
8. Le Projet de Recherche MCA/PAF :	18
9. Le programme d'Extension de l'Irrigation (PEI).....	19
Conclusion :	20
Chapitre 2 : Revêtement des canaux	21
Introduction.....	21
I. Revêtements rigides	21
1. Revêtement en béton de ciment	21
2. Revêtement en mortier.....	22
3. Revêtement en dalle ou bloc de béton préfabriqué.....	22
4. Revêtement en sols ciment.....	22
5. Revêtement en briques.....	23
6. Revêtement en pierres.....	23
7. Revêtement en béton armé.....	24
8. Revêtement en béton d'asphaltes :.....	24
II. Revêtement par membrane	25
1. Membranes non enterrées :	25
2. Membranes recouvertes :	25
III. Revêtement en terre :	25
1. Revêtement en terre compactée	26
2. Revêtement minces en terre compactée.....	26
3. Revêtement en terre meuble non compactée	26
Conclusion	27
Chapitre 3 : Evaluation des pertes par infiltration dans les canaux en terre	28
Introduction :.....	28
I. Paramètres descriptifs de l'infiltration.....	28

II. Facteurs influençant l'infiltration	29
III. Les méthodes d'évaluation des pertes par infiltration	30
1. Les formules empiriques.....	30
2. Méthodes utilisées pour la mesure des pertes par infiltration dans les canaux	33
3. Méthode par mesureur de perte par infiltration	35
4. Méthodes spéciales	37
IV. Quelques études faites sur réduire les pertes par infiltration	38
1. Méthodes utilisées dans les canaux d'irrigation au Sud d'Alberta	38
2. Application de Polyacrylamide (PAM) pour réduire l'infiltration de l'eau à travers les canaux sans doublure.....	39
3. Gainage des canaux :	39
4. La méthode de test Pouding.....	40
Conclusion	40
Chapitre 4 : Modélisation de l'infiltration	41
I. Modèles basés sur la masse infiltrée.....	41
1. Modèle de Holtan (1961).....	41
2. Modèle de Green- Ampt (1911).....	42
II. Equations basées sur le temps.....	44
1. Gardner, Widstoe (1921) et Horton (1940).....	44
2. Kostiaikov (1932), Lewis (1937)	45
3. Kirkham et Feng (1949).....	45
4. Philip (1957).	46
Chapitre 5: Rappel des travaux faits sur l'évaluation de l'efficience et la granulométrie des sols de Jorf-Erfoud	47
I. L'évaluation de l'efficience des canaux in situ.....	47
1. Canaux en terre	47
.....	48
2. Séguias bétonnées :.....	49
Conclusion	50
<i>Partie 2 : Méthodologie</i>	<i>51</i>
Chapitre 1 : Présentation du périmètre de Jorf-Erfoud	52
I. Milieu physique	52
1. La Situation géographique	52

2.	Le climat	52
3.	Les sols.....	53
II.	Ressources en eau	53
4.	Ressources souterraines	53
5.	Ressources de surface	53
Chapitre2 :	Méthodologie	54
I.	Recherche bibliographique :	54
II.	Essais de laboratoire :	54
1.	Analyse granulométrique	54
2.	Argiles utilisées.....	56
3.	Mesure de l'infiltration	57
□	Mode opératoire:.....	57
□	Matériel utilisé	58
III.	Compactage :	58
<i>Partie 3 :</i>	<i>Résultats et discussions.....</i>	<i>59</i>
Chapitre 2 :	Etude de l'infiltration sur les échantillons des sols au laboratoire.....	60
1.	Présentation des résultats	60
2.	Discussion	62
Conclusion	63
Chapitre 3 :	Etude expérimentale de la réduction de l'infiltration dans les échantillons testés	64
I.	Réduction de l'infiltration par l'ajout d'argile à différents taux d'humidité	64
1.	Essai à l'état sec	64
a.	Présentation des résultats	64
b.	Discussion :.....	67
2.	Essai à 5% d'humidité.	69
a.	Présentation des résultats :	69
b.	Discussion.....	72
3.	Essai à 10% d'humidité.	73
a.	Présentation des résultats :	73
b.	Discussion :.....	77
4.	Représentation des résultats en fonction du pourcentage d'argile :.....	78

II. Représentation graphique du taux d'infiltration dans un repère logarithmique : Cas de l'échantillon de la séguia Hanabou.....	81
1. Présentation des résultats	81
a. Représentation avec l'essai à l'état sec	81
b. Essai à 5% d'humidité	81
c. Essai à 10% d'humidité.....	82
2. Discussion :.....	83
3. Comparaison des résultats avec le modèle de Kostiakov (1932), Lewis (1937).....	84
III. Réduction de l'infiltration par ajout de la paille et l'argile : Cas de l'échantillon de la séguia Hanabou	84
1. Présentation des résultats	84
a. Mesure de l'infiltration en fonction de l'humidité.....	84
b. En fonction de l'argile	86
2. Discussion	88
IV. Comparaison des résultats obtenus:.....	89
Conclusions et recommandations	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	92
<i>Annexes</i>	94

Liste des figures

Partie I :

Figure1. 1: Répartition des périmètres de la PMH selon le nombre et la superficie (S.Laith,2008).	6
Figure1. 2: Statut foncier des terres en PMH (Laith, 2008).....	7
Figure1. 3: Moulinet hydrométrique.....	35
Figure1. 4: Dispositif de mesure des pertes en eau par un sac en plastique (Kraatz, 1977)..	36
Figure1. 5 : Pertes en eau dans la séguia Hanabou et Lgdima (H. Ennabbagui, 2015)	36
Figure1. 5 : Pertes en eau dans la séguia Jdid (bétonnée) (H. Ennabbagui, 2015)	36

Partie II :

Figure2. 1: Carte de la situation géographique de la zone de Jorf.....	52
figure2. 2: Courbe granulométrique des échantillons des séguias du périmètre Jorf Erfoud (H. Ennabbagui. 2015).....	57
figure2. 2: Triangle texturale	57
figure2. 4: Argile utilisée de la carrière d'Oulja de Salé.....	57
Figure2. 5: Appareil de démonstration de l'infiltration.....	58

Partie III :

Figure3. 1 : Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima seul à sec	60
Figure3. 2: Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou seul à sec	61
Figure3. 3:Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid seul à sec	61
Figure3. 4: Comparaison des taux d'infiltration dans les échantillons des trois séguias.....	63
Figure3. 5: Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec.....	64
Figure3. 6: Mesure du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec.....	65
Figure3. 7: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou.....	65
Figure3. 8: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou.....	66
Figure3. 9: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid.....	66
Figure3. 10: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid.....	67
Figure3. 11:Infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima avec 5% de teneur en eau	69

Figure3. 12: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 5% d'humidité	70
Figure3. 13: Infiltration dans l'échantillon de la séguia de Hanabou avec 5% de teneur en eau	70
Figure3. 14: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou 5% d'humidité	71
Figure3. 15: Infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid avec 5% de teneur en eau	71
Figure3. 16: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 5% d'humidité	72
Figure3. 17: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité	74
Figure3. 18: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité	74
Figure3. 19: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité	75
Figure3. 20: le taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité	75
Figure3. 21: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité	76
Figure3. 22: Le taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité	76
Figure3. 23: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité.	78
Figure3. 24: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité	79
Figure3. 25: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité.	80
Figure3. 26: Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à sec.	81
Figure3. 27: Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à 5% d'humidité.	82
Figure3. 28 : Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à 10% d'humidité.	82

Figure3. 29: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé la paille à sec.....	85
Figure3. 30: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille, à 5% d'humidité.....	85
Figure3. 31: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille, à 10% d'humidité.....	86
Figure3. 32: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 10% d'argile.....	86
Figure3. 33: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 15% d'argile.....	87
Figure3. 34: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 20% d'argile.....	87

Liste des tableaux

PARTIE I :

Tableau1. 1: Nombre de périmètres et leurs superficies par province (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Juillet 2008).....	13
Tableau1. 2: Périmètres de la Petite et Moyenne Hydraulique (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2014)	20
Tableau1. 3: Valeurs de C en fonction du type de revêtement (Kraatz, 1977).....	31
Tableau1. 4: Valeurs de C en fonction du type de sol (Kraatz, 1977).....	31
Tableau1. 5: Résultats de calcul des pertes en eau dans la séguia Lgdima (H. Ennabbagui, 2015).....	45
Tableau1. 6: Résultats de calcul des pertes en eau dans la séguia Hanabou (H. Ennabbagui, 2015).....	46
Tableau1. 7: Résultats de calcul des pertes en eau dans la séguia Jdid (H. Ennabbagui, 2015).....	47
Tableau1. 5: Pertes en eau moyenne dans les séguias en terre (H. Ennabbagui, 2015).....	48

Partie II:

Tableau2. 1: Résultats de l'analyse granulométrique des sols composant les séguias du périmètre de Jorf-Erfoud (H. Ennabbagui, 2015).....	53
---	----

Partie III :

Tableau 3. 1 : Variation du taux d'infiltration	63
Tableau 3. 2 : Taux d'infiltration dans les échantillons testés à sec	68
Tableau 3. 3: Taux d'infiltration dans les échantillons testés à 5% d'humidité.	73
Tableau 3. 4: Diminution de la vitesse d'infiltration des échantillons	77
Tableau 3. 5: Diminution de la vitesse d'infiltration de Hanabou avec de la paille.....	88

Liste des abréviations

AUEA : Association des Usagers d'Eau Agricole

DPA : Direction Provinciale de l'Agriculture

FDR : Fonds de Développement Rural

DRI-PMH : Développement Rural Intégré centré sur la Petite et Moyenne Hydraulique

FAO: Food and Agriculture Organization

GH: Grande Hydraulique

MCA : Millenium Challenge Account

PAF : Projet d'arboriculture Fruitier

PEI : Programme d'Extension de l'Irrigation

ORMVA : Office Régional pour la Mise en Valeur Agricole

PMH : Petite et Moyenne Hydraulique

SAU : Superficie Agricole

TRI : Taux de Rentabilité Interne

Liste des annexes :

Annexe 1: Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec	95
Annexe 2: Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 5% d'humidité	96
Annexe 3 : Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité	97
Annexe 4 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à sec	98
Annexe 5 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 5% d'humidité	98
Annexe 6 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité	99
Annexe 7 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à sec	100
Annexe 8 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 5% d'humidité	101
Annexe 9: Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité	101
Annexe 10 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à sec	102
Annexe 11: Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 5% d'W	102
Annexe 12 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 10% d'humidité	103

Introduction générale

L'eau, une ressource essentielle et vitale, est d'une inégale répartition géographique souvent inaccessible pour certaines populations. Avec l'augmentation de la demande et la rareté de l'offre, sa conservation demeure un problème mondial qui s'aggrave quotidiennement. Au Maroc la rareté de l'eau due au climat semi-aride du pays, à la pluviométrie irrégulière et à la demande croissante de cette ressource, incite l'Etat à intervenir pour l'économie de l'eau et sa valorisation. L'agriculture, le plus gros consommateur d'eau brute au Maroc (l'irrigation consomme 85% des eaux mobilisées au Maroc) (**Jraich, et al., Mars 2007**), grâce au plan national d'économie d'eau, vise la rentabilisation des ressources hydriques par la réhabilitation et la modernisation des infrastructures d'irrigation, l'intensification de la mise en valeur et le renforcement de la gestion des systèmes d'irrigation par les associations des usagers. L'eau est un bien rare et précieux qui ne peut plus être gaspillé dans un système inefficace, surtout dans des zones qui souffrent de la faiblesse et de l'irrégularité des ressources en eau, qui est le cas pour la PMH au Maroc (**El Bouari, 2004**).

Plusieurs auteurs ont essayé de définir la PMH de façon plus ou moins détaillée en raison du domaine d'intérêt. Selon (**Abdellaoui, 1986**) la PMH regroupe tous les petits et moyens périmètres de taille relativement modeste, dont la gestion est conduite totalement ou partiellement par les irrigants eux-mêmes. **Pascon (1984)** rapporte que le terme PMH s'applique aux petites surfaces de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares ; il ajoute que la PMH comprend tout ce qui n'est pas irrigué par de grands ouvrages. Ces périmètres sont caractérisés par l'utilisation d'équipements traditionnels et par un faible effectif d'irrigants. Au Maroc, la PMH représente 38% du potentiel national irrigable de façon pérenne, soit 510 000 ha auxquels s'ajoutent 300 000 ha qui peuvent bénéficier d'eaux saisonnières ou de crue. 35 à 40 % des ressources en eau du pays seront utilisées par la PMH (**Laith, 2008**) ce qui motive l'Etat à entreprendre l'installation et la réhabilitation de l'infrastructure hydro-agricole dans ces périmètres.

C'est dans ce contexte que l'amélioration de l'efficacité des canaux d'irrigation est un moyen incontournable qui permet la valorisation et la rentabilisation de l'eau agricole en réduisant l'infiltration de l'eau au cours du transport de la source à la parcelle. Ainsi l'adduction et la distribution de l'eau avec un strict minimum de pertes et de frais aura une influence directe sur le projet. C'est dans cette perspective que ce travail sera abordé.

Problématique :

La réhabilitation des réseaux traditionnels des périmètres de PMH, vise en premier lieu l'amélioration des performances des réseaux traditionnels d'irrigation et par conséquent une meilleure utilisation des ressources hydriques disponibles.

Le revêtement des canaux d'irrigation en terre présente un problème technique et financier majeur. Le bétonnage des canaux présente une charge très lourde à la fois pour le Ministère de l'Agriculture ainsi que pour les usagers mais demeure nécessaire pour éviter les pertes d'eau par infiltration.

Ainsi plusieurs solutions sont envisagées. Tout ceux-ci nous a conduits à poser la problématique suivante :

Par quels moyens pourrait-on mieux réduire les pertes d'eau par infiltration dans les canaux en terre et ainsi améliorer leur efficacité ?

Objectifs :

Ainsi pour résoudre cette problématique, nous nous sommes fixés des objectifs. Ces objectifs globaux assignés à ce travail sont :

- Identifier la bonne composition en matériau des canaux en terre pour améliorer leur efficacité au moindre coût ;
- Identifier l'effet de la compaction sur les matériaux à utiliser ;
- Améliorer l'efficacité des canaux d'irrigation. Cela nous permettra de juger le degré d'amélioration des performances des réseaux d'irrigation.

Méthodologie de travail

Pour atteindre ces objectifs, la démarche suivante a été adoptée :

-Recherche bibliographique:

C'est la synthèse des travaux de recherche réalisés sur les méthodes d'évaluation des pertes d'eau et l'amélioration de l'efficacité des canaux d'irrigation dans les périmètres de PMH.

-Travail de laboratoire :

- Procéder à des analyses du sol.
- Expérimenter des méthodes d'amélioration d'efficacité pour résoudre le problème des pertes par infiltration.

PARTIE1 : BIBLIOGRAPHIE

Chapitre 1 : la Petite et Moyenne Hydraulique

Introduction

La Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) désigne des périmètres irrigués traditionnels de tailles faibles inférieurs à 100 hectares et dépassant rarement 3000 à 5000 ha. Dans ces périmètres traditionnels, l'eau d'irrigation est mobilisée par des ouvrages construits par les communautés d'irrigants (captages de sources, khéttaras, norias, seuils de dérivations au fil de l'eau etc.) (Laith, 2008). Les usagers de ces périmètres, grâce à un savoir-faire transmis de génération en génération, mobilisent des ressources en eau pérennes, saisonnières ou de crues. L'eau dans ces périmètres d'irrigation est distribuée de la source jusqu'aux parcelles par des réseaux de canaux souvent en terre placés suivant des tracés sinueux et la répartition de l'eau pour chaque exploitant est régie par des droits d'eau traditionnellement établis sur la base de règles coutumières. Les ressources en eau dans ces périmètres sont généralement irrégulières et les ouvrages hydro agricoles sont en mauvais état ce qui fait que les rendements enregistrés sont au-dessous de la moyenne.

I. La situation de la PMH au Maroc

En PMH, l'irrigation pérenne couvre une superficie de l'ordre de 484.000 ha soit 35% environ de la superficie irriguée pérenne du pays. Les superficies de la PMH irriguées par les eaux saisonnières et de crues sont estimées à environ 300.000 ha. Les recensements les plus récents, dénombrent un total de 2.927 périmètres d'irrigation de PMH. En nombre, ce sont les périmètres irrigués de moins de 100 ha qui dominent puisqu'ils représentent 66 % du nombre mais ne couvrent que 11 % de la superficie totale irriguée. En surface, les périmètres de plus de 1 000 ha couvrent 53 % des superficies totales irriguées alors qu'ils ne représentent en nombre que 5%. Globalement, c'est le statut Melk des terres qui prédomine en PMH, où il représente 75 % des superficies irriguées. Les terres de statut collectif représentent 16 %, domanial 5 % et celles de statut Habous et Guich 4 %. (Ministère de l'agriculture et de la pêche, Juillet 2008).

L'irrigation en PMH fait généralement appel à des ressources en eau peu ou pas régularisées soit par des dérivations au fil du cours d'eau, au moyen de barrages-prises n'introduisant pas de régularisation notable des débits des oueds dont le régime reste fondamentalement

irrégulier, soit par les eaux souterraines, mobilisées par diverses techniques et ouvrages de captage (drains, khetaras, puits, forages) et qui sont sujettes à des variations saisonnières et interannuelles.

II. Caractéristiques de la PMH

1. Taille des périmètres de la PMH

La Petite Hydraulique concerne des périmètres de superficie inférieure à 100 ha qui dominant avec 66% du nombre et ne couvrent que 11% de la superficie irriguée, alors que la Moyenne Hydraulique comprend des périmètres dont la superficie dépasse les 1000 ha et occupe 5% du nombre et 53% de la superficie. (Laith, 2008).

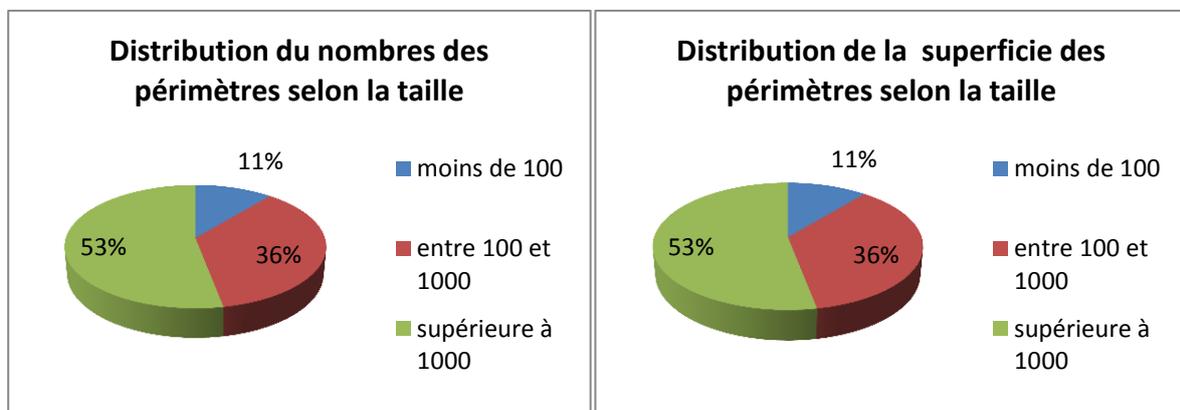


Figure1. 1: Répartition des périmètres de la PMH selon le nombre et la superficie (Laith,2008).

2. Statut foncier :

Le statut Melk des terres prédomine en PMH et il représente 75 % des superficies irriguées. Les terres de statut collectif représentent 16 %. Celles de statut domanial 5 % et celles de statut Habous et Guich 4 % (Laith, 2008).

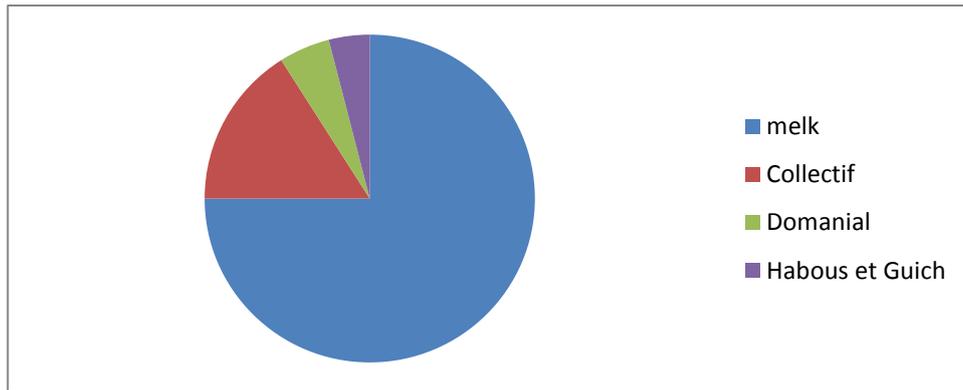


Figure1. 2: Statut foncier des terres en PMH (Laith, 2008).

3. Ressources en eau

Selon l'origine et la régularité des ressources en eau, on peut distinguer deux catégories de périmètres de PMH :

- Périmètres d'irrigation saisonnière et de crue

Ces périmètres s'étalent sur 300.000 ha de superficie, ils sont alimentés en eau uniquement en périodes de bonne hydraulicité, et par les eaux de crue des oueds. Il s'agit surtout des périmètres du sud de l'Atlas et les hauts plateaux de l'Oriental.

Les ouvrages de dérivation dans ces périmètres sont souvent traditionnels et l'épandage des crues permet la pratique de cultures céréalières sur des superficies non négligeables et contribue aussi à la recharge des nappes souterraines exploitées à l'aval des zones d'irrigation.

- Périmètres d'irrigation pérenne

Ces périmètres s'étalent sur 484.000 ha de superficie dont les ressources en eau sont disponibles durant une longue période de l'année. Cette catégorie regroupe plusieurs types de périmètres propres à des situations géographiques particulières, tels que :

- Les périmètres des plaines et vallées irrigués au fil de l'eau,
- Les périmètres constitués des basses terrasses alluviales situées dans les méandres des rivières et irrigués par relevage des lâchés des barrages existants à l'amont,

- Les périmètres traditionnels de montagne et de piedmont alimentés gravitairement par des sources d'eau pérennes,
- Les périmètres irrigués par pompage dans les nappes aquifères du littoral ou des plateaux d'oasis dans les zones sub-sahariennes alimentés par des eaux de puits, khetaras ou forages. (ENNABBAGUI, 2014).

Les règles qui régissent la gestion des ressources en eau sont coutumières, elles sont transmises de génération en génération sans prendre en considération les changements que subissent les périmètres de la PMH. Ces règles sont variables d'un périmètre à l'autre, et conditionnent le tour d'eau et même les droits d'eau. La gestion se fait généralement par les Machiakha qui regroupent les chefs des grandes familles de PMH, ceci réduit la prise de décision à une catégorie spécifique d'agriculteurs. Les droits d'eau sont très compliqués et méconnus aussi bien à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle d'un périmètre localisé. Cette complexité résulte du nombre élevé d'ayants droit, parfois non connus à cause des transactions multiples d'eau et de la liberté dont disposent les agriculteurs en matière de transfert des droits d'eau sur le réseau. (ABDELLAOUI, 1986).

4. Les infrastructures hydro-agricoles.

Les infrastructures sont très rudimentaires. On y rencontre des seuils traditionnels ou modernes. Ces structures demeurent les moyens élémentaires pour mobiliser les eaux de surface. Le transport et la distribution de l'eau sont assurés par des canaux (séguias) en terre ou revêtus, et des Mserf. On distingue entre autres :

- Les barrages de dérivation des eaux de crue dominant les superficies à irriguer ;
- Les dérivations traditionnelles des eaux de crue pour renforcer l'irrigation des petits périmètres de la PMH,
- Les khetaras pour recharger les nappes surexploitées avec les eaux de crue,
- Les khetaras drainant les nappes avec des puits de plus en plus nombreux, équipés en pompes.

III. Les problèmes rencontrés dans la PMH

1. Le réseau d'irrigation et les ouvrages : faible efficience

Dans les périmètres de la PMH, la mauvaise qualité du réseau et des ouvrages réduit l'efficience de transport et de distribution de l'eau à la parcelle. L'absence d'ouvrage d'accumulation (barrages...) dans la plupart des périmètres de PMH rend difficile la mobilisation des eaux en tête des réseaux, mais, aussi le transfert de l'eau d'une saison à l'autre. Ces périmètres se heurtent à des difficultés physiques lorsque les oueds véhiculent des crues dévastatrices. D'autres institutionnelles, lorsque des périmètres existants en aval reçoivent des dotations insuffisantes par rapport à celles prélevées en amont. D'autres difficultés d'entretien de prises (tête morte, vannes...) sont également à noter après le passage des crues (**Bazzi, 1987**).

Les réseaux d'irrigation souvent traditionnels, constitués de seguias en terre, qui présentent bien souvent de grands inconvénients (sinuosités allongeant le réseau, sur-calibrage, nécessité d'entretiens permanents...) et sont par conséquent peu efficaces ce qui cause des pertes énormes d'eau, que ce soit par infiltration ou par débordement dans les séguias sous dimensionnées ou envahies par les mauvaises herbes (**Abdellaoui, 1986**).

2. Les problèmes fonciers

La structure du foncier présente un handicap pour la PMH, en raison de la complexité des situations et la faiblesse des moyens pour les résoudre (**Pascon, 1984, El Ghzali, 1999**). Parmi les contraintes majeures, on peut citer :

- La petitesse des parcelles (84% des exploitations ont une superficie inférieure à 2ha)
- Le morcellement : c'est la division des parcelles par héritages successifs, ce qui conduit à des surfaces tellement petites et réduites que leur partage devienne physiquement difficile entraînant l'impossibilité de les équiper en réseau d'irrigation (canalisation, ouvrages de prise, voies d'accès)
- L'indivision : est une faiblesse très marquante dans la zone de la PMH. Elle est liée à une situation d'émigration ; le Co-indivis parti en ville ou à l'étranger, laisse ses terres à ses cohéritiers pour les exploiter et,

l'équipement risque de donner des droits aux cohéritiers qui se retireront difficilement par la suite.

- Le démembrement : sur la même parcelle se retrouvent trois propriétaires différents ou même trois groupes d'indivisaires distincts : les propriétaires de la terre, ceux des arbres qui, comme l'olivier ou le palmier, sont de quasi immeubles en raison de leur longévité et les propriétaires des eaux d'irrigation

3. Droits d'eau

Les droits d'eau sont très compliqués et méconnus aussi bien à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle d'un périmètre localisé. Cette complexité résulte du nombre d'ayants droit élevé, parfois non connu à cause des multiples transactions qui s'effectuent sur l'eau et de la liberté dont disposent les agriculteurs en matière de transfert des droits d'eau sur le réseau (**Abdellaoui, 1986**).

Sur un même réseau, les membres d'une même collectivité, considérés comme fondatrice se partagent les eaux selon cinq modalités principales (**Pascon, 1984**) :

- Le régime collectif, où chaque ayant droit dispose de sa part du fait de son appartenance au groupe. Les parts plus ou moins égales évoluent, avec l'accroissement démographique. Ces droits sont inaliénables, mais peuvent être donnés en association ou en location temporaire ;
- Le régime des droits d'eau lié à la terre ; on dit que « l'eau est mariée à la terre » dans le sens que le propriétaire ne peut approprier l'un des facteurs sans l'autre, ni vendre l'eau sans la terre ni faire l'inverse. La part d'eau n'est pas toujours proportionnelle à la surface : parfois, les parcelles placées en tête ont réglementairement une dose d'eau plus forte que les parcelles situées en aval.
- Le régime des droits d'eau lié au système de culture, similaire au précédent : les ayants droits disposant d'une parcelle située telle année dans la sole maïs recevront une dose d'eau 'maïs', proportionnelle à la surface qu'ils ont été autorisés à planter en maïs. Ceci est particulièrement respecté pour les cultures d'été en période d'étéage.
- Le régime des droits d'eau privatifs indépendants ou Melk ; où l'eau est une propriété individuelle, immeuble, aliénable et séparée de la terre ;

- Le régime mixte observé en particulier au sein du mode collectif où il peut y avoir un lignage nobiliaire ou religieux qui dispose d'un droit séparé.

4. Les problèmes de gestion du réseau et de distribution de l'eau

Dans les périmètres de PMH, les modalités de distribution de l'eau sont très variées et complexes (régime d'abondance, régime de pénurie, régime d'extrême restriction...), en fonction de l'hydraulicité de la source d'eau (source, rivière, puits...). Au niveau de ces périmètres, les collectivités sont parvenues, dans des conditions extrêmement difficiles dues à la variation des débits, à la multiplicité des ayants-droits et à la parcellisation des droits, à instaurer des systèmes de gestion ingénieux et compliqués.

En effet, les populations d'irrigants, dans plusieurs périmètres traditionnels, fonctionnent sur la base d'assemblées générales. Les réunions sont organisées dans le cadre de la Jmaa, la présence de l'Etat est une exception, elle se fait par le biais du 7^{ème} membre pour les AUEA. Lors de ces assemblées, on décide sur la gestion et l'entretien du réseau et des ouvrages hydro-agricoles, sur le choix des aiguadiers qui s'occuperont de la police de l'eau et sur autres tâches que la communauté fera dans les jours à venir. On note que certains périmètres fonctionnent sans aucun aiguadier surtout lorsque l'eau est relativement abondante. Dans ce cas, l'utilisateur vient à son tour prendre l'eau sans aucune contestation. En cas de pénurie d'eau, on exige un aiguadier qui préside la distribution de l'eau d'irrigation. En plus, le travail de l'aiguadier s'avère fort délicat lorsque les parcelles sont minuscules et dispersées (Pascon, 1984).

IV. Stratégies et programmes de réhabilitation et modernisation des périmètres de la PMH

1. Projet de développement rural intégré centré sur la Petite et Moyenne Hydraulique (DRI-PMH)

Le projet de développement rural intégré centré sur la Petite et Moyenne Hydraulique (DRI-PMH), concerne 55 périmètres de PMH répartis dans les trois provinces d'Azilal, de Khénifra et d'Al Haouz. Ce projet est cofinancé par la Banque Mondiale à hauteur de 32,2 Millions de dollars US. Le coût de ce projet est de 458 millions de Dirhams.

Les objectifs du projet DRI-PMH sont :

- ✓ l'amélioration des revenus et de la qualité de vie des communautés rurales qui dépendent des périmètres d'irrigation traditionnels de Petite et Moyenne Hydraulique.
- ✓ Le pilotage de nouveaux dispositifs institutionnels conçus pour assurer une plus grande participation communautaire et l'intégration des programmes sectoriels par le biais du Fonds de Développement Rural (FDR).

Ce projet consiste en :

- ✓ la réhabilitation des infrastructures hydro-agricoles de 55 périmètres de Petite et Moyenne Hydraulique sur une superficie de 11.100 ha et l'amélioration de la gestion des systèmes d'irrigation;
- ✓ l'aménagement des pistes rurales de désenclavement de ces périmètres sur une longueur de 258 Km répartie sur 41 liaisons ;
- ✓ L'aménagement et la création de 61 systèmes d'alimentation en eau potable et points d'eau ;
- ✓ La construction et l'aménagement de 127 établissements scolaires ;
- ✓ L'aménagement de 23 formations sanitaires ;
- ✓ la formation des Associations d'Usagers de l'Eau Agricole ;
- ✓ Le renforcement de la mise en valeur agricole et de l'organisation des producteurs;
- ✓ la vulgarisation et l'animation rurale.

Le coût de réhabilitation des infrastructures hydro-agricoles de 55 périmètres PMH est de 228 Millions de Dirhams, ainsi que sa rentabilité économique interne estimée au taux (TRI) de 13%.

2. Projet d'aménagement hydro-agricole en PMH dans les provinces du Nord (PMH-NORD)

Le projet PMH-Nord concerne l'aménagement hydro-agricole de 71 périmètres irrigués de PMH dans la zone d'action de l'ORMVA de la Moulouya et des DPA de Taza, Oujda, Nador et Figuig sur une superficie totale de 15.000 ha. Le projet est financé par la KfW.

Tableau1. 1: Nombre de périmètres et leurs superficies par province (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Juillet 2008).

DPA	Nombre de périmètre	Superficie en Ha
Taza	37	6.746
Oujda	1	56
Nador	21	3.118
ORMVAM	11	4.430
Figuig	1	650
Total	71	15.000

Les objectifs du projet PMH-Nord sont comme suit :

- ✓ Amélioration de l'efficacité des réseaux d'irrigation ;
- ✓ Amélioration des revenus et des conditions de vie des populations rurales des périmètres concernés;
- ✓ Sécurisation et augmentation de la production aussi bien végétale qu'animale;
- ✓ Limitation de l'exode rural ;
- ✓ Organisation des agriculteurs dans le cadre d'AUEA ;
- ✓ Protection des ressources naturelles.

Le projet consiste en :

- ✓ La réhabilitation des infrastructures hydro-agricoles de 71 périmètres de PMH sur une superficie de 15.000 ha par l'amélioration de la gestion des systèmes d'irrigation (barrage-seuil de dérivation, ouvrages d'art, seguias, ouvrages annexes,);
- ✓ La formation des Associations d'Usagers de l'Eau Agricole.

Le coût global du projet s'élève à 320 millions de dirhams dont le financement est assuré par la KfW, et la rentabilité économique interne du projet est estimée au taux (TRI) de 14%.

3. Projet d'aménagement hydro-agricole dans la région de Souss-Massa (PMH-III)

Le projet PMH-III concerne la région du Souss-Massa au niveau des zones d'action de l'ORMVA du Souss-Massa et de la DPA d'Agadir.

L'objectif principal du programme PMH-III est l'augmentation significative et durable des revenus des exploitations agricoles à travers :

- ✓ La rationalisation de l'utilisation des ressources en eau par la modernisation et/ou la réhabilitation des périmètres d'irrigation existants ;
- ✓ L'intensification de la mise en valeur agricole ;
- ✓ Le renforcement de la gestion participative de l'irrigation par l'implication et la responsabilisation des usagers dans la prise en charge de la gestion et l'exploitation des équipements d'irrigation à travers la création et la promotion des AUEA.

Le programme consiste en l'aménagement des périmètres d'irrigation de PMH d'une superficie totale de 7.235 Ha réparti comme suit :

- Périmètre G-1 d'Aoulouz : 4.450 Ha
- Périmètres P12 et P13, en aval du barrage Imi El Kheng : 360 Ha
- Périmètres en zone de montagne [ORMVA-SM] : 1.705 Ha
- Périmètres en zone de montagne [DPA d'Agadir] : 720 Ha

Le coût global du projet PMH-III est de 132 Millions de DHS dont 88,2 Millions de dirhams financés par la KfW. La durée de réalisation de ce projet est de trois ans (2008-2010).

Les principales composantes du projet concernent la réhabilitation des réseaux traditionnels dont le coût s'élève à 86 Millions de DHS, répartis comme suit :

- Périmètres relevant de la zone d'action de l'ORMVA-SM : 76 Millions de DHS dont :
 - La mise en place d'un réseau d'irrigation au niveau du périmètre G1 Aoulouz : 39 MDH

- La mise en place d'un réseau d'irrigation localisé au niveau des périmètres P-12 et P-13 : 12 MDH
 - La réhabilitation de seguia en zone montagneuse : 25 MDH
- Périmètres relevant de la zone d'action de la DPA d'Agadir : 10 MDH

Le coût des autres composantes (études d'exécution, assistance technique, coordination et équipement de la DPA d'Agadir et de l'ORMVA-SM) est de 21 MDH. Les imprévus physiques et financiers sont estimés à 24 MDH.

La rentabilité économique interne du projet est estimée au taux (TRI) de 14%.

4. PMH pour le développement des zones Bour

Il s'agit de la poursuite de l'exécution de 3 projets de mise en valeur en Bour comportant des actions d'aménagement hydro-agricole. Ces PMVB concernent les provinces de Boulemane (Missour), Khénifra (Ansegmir) et Taza (Taddert). Ces projets sont financés sur le budget général.

La composante d'aménagement hydro-agricole consiste à l'aménagement de 43 km de séguias et la construction de 3 ouvrages d'art.

5. Programme MEDA de développement rural intégré et gestion des ressources naturelles dans les provinces du Nord (DRI-GRN)

Concernant la composante PMH, les actions réalisées portent sur les travaux de réhabilitation de 4.800 ha de seguias avec un coût de 1,7 MDH. D'autres actions de réhabilitation de PMH sont en cours de réalisation à partir de 2008 au niveau de la plaine d'Oujda sur 1.205 ha avec un coût de 5 MDH.

La rentabilité économique interne du projet telle qu'évaluée dernièrement dans le document de l'identification du projet « composante PMH » est estimée au taux (TRI) de 13%.

6. Programme continu de sauvegarde des périmètres de PMH

Ces projets englobent des actions de réhabilitation des réseaux d'irrigation des périmètres de PMH par :

- La sauvegarde de la pérennité des ouvrages d'irrigation des périmètres de PMH exposés souvent aux effets des intempéries et surtout aux crues dévastatrices ;
- L'amélioration de l'efficacité du réseau d'irrigation ;
- L'augmentation de la production agricole.
- les conditions de raréfaction des ressources en eau et la récurrence des années de sécheresse d'une part et des crues dévastatrices d'autre part, la PMH, située dans des zones fragiles et vulnérables, requiert une attention particulière.

Ainsi, en attendant de réaliser un aménagement intégral de ces périmètres, des interventions ponctuelles sont programmées chaque année pour permettre de sauvegarder les périmètres et maintenir le service de l'irrigation. Ces interventions permettent également :

- La valorisation de l'eau d'irrigation à travers l'amélioration des performances de l'infrastructure de mobilisation, de transport et de distribution d'eau ;
- L'intensification de la production agricole ;
- L'amélioration des revenus des populations ;
- La création de l'emploi en milieu rural.

Les aménagements proposés concernent la mobilisation des eaux pérennes et des eaux de crues à travers la réhabilitation et la construction des séguis, des bassins d'accumulation et des seuils de dérivation, ...

En plus, des actions annuelles sont prévues, concernant la maintenance des périmètres de PMH par des brigades mécanisées au niveau des DPA de Guelmim, Tiznit, Tata, Marrakech, Chichaoua, Safi, Fès, Al Hoceima, Oujda et Taza et les ORMVA de Tafilalet et Ouarzazate.

Actuellement, les travaux d'aménagement et de maintenance des périmètres de la Petite et Moyenne Hydraulique concernent :

- L'achèvement sur une superficie totale de 10.067 ha
- la poursuite des travaux sur une superficie totale de 31.495 ha dans 39 périmètres ;
- le démarrage de 9.198 Ha répartis sur 76 périmètres ;
- le démarrage d'un programme de convergence PMH-INDH au niveau de la DPA d'Azilal concernant 27 périmètres et la poursuite au niveau de la DPA de Beni Mellal sur une superficie totale de 690 ha concernant 10 périmètres.

La rentabilité économique interne de ce programme fluctue entre 14 et 21% selon la nature et le degré d'importance des infrastructures réhabilitées. Une récente évaluation menée dans le cadre de la préparation du projet MCC « composante PMH » estime le taux de rentabilité pour un aménagement intégral des périmètres de la PMH à 21%.

7. Extension de la PMH – Périmètre SAHLA

Le projet d'aménagement hydro - agricole du périmètre Sahla à Taounate concerne l'aménagement et la mise en valeur d'une superficie brute de 3.240 ha dans la province de Taounate. Il concerne 2.900 exploitations et 7.400 habitants.

Le projet, dont le coût est estimé à 532 Millions de DH, a bénéficié d'un don de l'Union Européenne d'une somme de 28,7 Millions d'Euros. Il sera géré par les Associations des Usagers de l'Eau Agricole « AUEA » créées à cet effet et s'élevant au nombre de sept.

Le projet vise en plus de l'aménagement hydro agricole des propriétés, l'amélioration de la mise en valeur du périmètre par le développement de filières valorisantes, la mise en place d'organisations professionnelles pouvant assurer l'organisation et la commercialisation de la production, la formation des agriculteurs et des fils d'agriculteurs ainsi que la promotion de projets générateurs de revenus au profit des femmes rurales.

Les composantes du projet sont au nombre de quatre :

- les travaux d'aménagement hydro-agricole ;
- l'appui à l'organisation des usagers ;
- l'appui à la mise en valeur ;
- l'appui institutionnel.

Les travaux d'aménagement ont démarré en 2005 et seront achevés en 2008 portant sur la réalisation d'un ouvrage de prise sur le barrage Sahla, un ouvrage de régulation en tête, des réseaux d'irrigation, d'assainissement et de pistes ainsi que sur les bornes et les équipements internes.

Les autres composantes sont en cours d'exécution, et sont conduites par des experts de l'assistance technique à l'unité de gestion du projet en concertation avec des services centraux et provinciaux du Ministère ainsi qu'avec les bénéficiaires.

L'exercice 2008 a vu l'achèvement des travaux et la mise en eau progressive du périmètre à partir du mois de septembre.

Les crédits nécessaires pour achever le projet sont de 53 millions de DH au titre de l'exercice 2009. Ils se répartissent en :

- ✓ Don UE : 58 MDH
- ✓ Budget général : 97 MDH

La rentabilité économique interne du projet est évaluée au taux (TRI) de 15%.

(Référence : Direction de l'irrigation au Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime,).

8. Le Projet de Recherche MCA/PAF :

Le Projet d'Arboriculture Fruitière (PAF), financé par le gouvernement des Etats Unies d'Amérique à travers le Millenium Challenge Account (MCA) a pour objectif de développer le secteur arboricole dans les régions les plus vulnérables : régions pluviales(Montagnes) et régions irriguées (PMH et Oasis). Il a pour objectif de réduire la pauvreté dans ces zones par amélioration des revenus des agriculteurs et par la conservation de ses ressources naturelles.

Le projet concerne quatre espèces d'arbres fruitiers qui sont l'olivier, le palmier dattier, le figuier et l'amandier. IL couvre une superficie totale de 230000Ha et bénéficie à 136000 exploitations agricoles soit près d'un million d'habitants ruraux.

Dans un objectif d'accompagnement des activités du PAF en matière de recherche-développement, une convention de recherche développement a été signée le 29 avril 2010 entre le Consortium de recherche composé de l'IAV HassanII, l'INRA, l'ENA de Meknès et l'ENFI, d'une part, et le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et l'Agence du Partenariat pour le Progrès d'autre part. Cette convention prévoit pour la mise en œuvre d'un programme de recherche répondant aux objectifs spécifiques du PAF, notamment en termes d'outils, de méthodes et d'approches pour assurer son efficacité sur le terrain.

Le programme de recherche proposé par le consortium s'articule autour de 4 axes :

- ✓ Axe 1 : Conservation des sols ;
- ✓ Axe 2 : Conduite technique des cultures ;

- ✓ Axe 3 : valorisation des productions ;
- ✓ Axe 4 : l'irrigation.

Ce programme mobilise environ

- ✓ 100 chercheurs et Enseignants-chercheurs ;
- ✓ 22 techniciens ;
- ✓ 5 doctorants ;
- ✓ Plusieurs étudiants en fin de cycle ingénieur.

9. Le programme d'Extension de l'Irrigation (PEI).

Le programme de l'Extension de l'irrigation a pour ambition de résorber le décalage entre les superficies dominées par les barrages réalisés ou en cours de construction pour la période 2008-2013 par l'équipement d'une superficie de près de 159280 ha à l'horizon 2020 selon la répartition suivante :

- ✓ 116 100 ha en Grande Hydraulique ;
- ✓ 43 180 ha en PMH.

Le cout de ce programme est estimé à 21,5 Milliards de DH.

A la fin de 2013, le Programme d'Extension de l'Irrigation (PEI) associé aux barrages a permis d'atteindre les objectifs suivants :

- ✓ Achèvement des études d'aménagement hydro-agricole sur une superficie de près de 80000 Ha ;
- ✓ Poursuite des études sur une superficie de près de 79000 Ha ;
- ✓ Achèvement des travaux sur environ 4700 Ha dans les oasis de Figuig et les périmètres d'Ansegmir ;
- ✓ Poursuite des travaux d'aménagement sur environ 39 000 ha soit 25% de la superficie totale du programme. (**Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2014**)

Les projets du PEI en chantier de travaux en 2013 ont concerné les périmètres mentionnés dans le tableau

Tableau1. 2: Périmètres de la Petite et Moyenne Hydraulique (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2014)

Région	DPA/ORMVA	Barrage	Périmètre d'irrigation	Superficie (ha)	Coût du projet (Mdh)	Période de réalisation des projets
Meknes-Tafilalet	DPA khénifra	Tamalout	Ansgmir	4 000	65	Achevé en 2013
Oriental	DPA Figuig	Sfeissef	Ouasis de Figuig	700	200	Achevé en 2014
Fes-Boulemane	DPA Fès	Idriss 1 ^{er}	Moyen Sébou (2ème tranche)	4 600	865	2010-2014
Taza-Taounate-Al Hoceima	DPA Taounate	Bouhouda	Bouhouda	2 800	460	2010-2014
Marrakech-Tansift-Al Haouz	DPA Chichaoua	Taskourt	Assif El Mal	3 600	118	2011-2013
Tanger-Tétouan	DPA Tétouan	Oued Martil	Mhajrat-Ajras	1 500	180	2011-2014
Tanger-Tétouan	DPA Chaouen	My. Bouchta	Dar Akobaâ	400	60	2011-2014
Chaouia-Ourdigha	DPA khouribga	Chbika	Chbbika	200	23	2011-2013
Meknes-Tafilalet	ORMVA Tafilalet	Timkit	Timkit	1 100	38	2011-2014
Oriental	ORMVA Moulouya	Oued Za	Tafrata	1 330	300	2012-2016
Total PMH				19 380	3 218	

Conclusion :

La Petite et Moyenne Hydraulique connaît plusieurs difficultés pour son développement à savoir le problème de foncier, les droits d'eau, le réseau et les ouvrages hydrauliques mais également la gestion des réseaux et la distribution de l'eau. De nombreux programmes et projets ont été mis en place pour essayer de résoudre les problèmes posés et ainsi améliorer les conditions de vie dans ces localités.

Chapitre 2 : Revêtement des canaux

Introduction

Pour garantir la réduction des pertes par infiltration, le contrôle de la croissance des mauvaises herbes, la diminution de l'engorgement des terres adjacentes la réduction des coûts de maintenance et d'excavation et facilité le nettoyage, la diminution de la rugosité hydraulique, le revêtement des canaux devient nécessaire. En effet, du fait de l'augmentation de la demande en eau, la conservation et la valorisation de ce dernier devient de plus en plus crucial. Pour contribuer à cela il faut penser au revêtement des canaux. Le matériau de revêtement doit être disponible sur place ou à coût raisonnable pour rendre le projet rentable.

I. Revêtements rigides

Les revêtements rigides ou à surface dure, sont tous des revêtements construits en béton, mortier, sol ciment, matériaux asphaltiques, briques et pierres.

Afin de bien réaliser ce type de revêtement, plusieurs considérations sont prises en comptes telles que ; les sections transversales, les sols de fondations et leurs stérilisation, le cout, la disponibilité des matériaux, le drainage, la vitesse de l'eau, la rugosité etc...

1. Revêtement en béton de ciment

Ce type de revêtement assure une longue durée de vie (40ans), il convient aux canaux de grandes et de petites dimensions, il est imperméable aux végétations parasites, ne demandant pas un entretien coûteux et assure une étanchéité satisfaisante (les pertes admissibles sont de 20l/m²/j et ainsi permet l'écoulement à grandes vitesses).

Cependant, le revêtement en béton a un taux considérable de pertes par infiltration, dues aux fissures surtout quand le béton n'est pas armé. Les effets de crevasses peuvent être obturés par l'asphalte.

2. Revêtement en mortier.

Les revêtements en mortier sont réalisés par une projection au moyen d'air comprimé du mortier qui est constitué de ciment, de sable et d'eau. L'épaisseur de la couche varie de 2,5 à 7,5 cm et on utilise un grillage pour mieux la renforcer.

Ce type de revêtement ne demande ni un aménagement soigné du sol de fondation, ni un alignement précis, ni une conformité rigoureuse aux plans d'exécution. Néanmoins les inconvénients de ce type de revêtement sont :

- Une demande en ciments élevés, du fait de l'absence des agrégats grossiers dans le mélange ;
- La mise en place est relativement lente ;
- La nécessité de disposer d'une main d'œuvre qualifiée ;

3. Revêtement en dalle ou bloc de béton préfabriqué

Les dalles sont utilisées sur un sous revêtement en feuilles de plastique. Cela permet d'assurer une meilleure étanchéité et une durabilité suffisante. L'épaisseur des dalles varie de 5 à 7,5 cm. Ces types de revêtement sont utilisés dans les zones où la main d'œuvre est à bon marché et où il est impossible de bétonner l'hiver. Cependant, on note les inconvénients suivants :

- Susceptibilité au tassement inégal ;
- Détérioration dans les fortes courbes. Ainsi, on prévoit l'utilisation d'un béton mis en place ou projeté à l'air comprimé ;
- Ne s'adapte pas à l'emploi dans les radiers.

4. Revêtement en sols ciment

Ce type de revêtement est réalisé à partir du sol sableux, de ciment et d'eau. Il est utilisé principalement dans les revêtements routiers soit par mélange sec ou mélange plastique. L'épaisseur de revêtement varie entre 5,5 et 15 cm.

➤ Sols ciment par mélange à sec

Il exige des pentes latérales plus raides pour des raisons de coûts de construction. Les matériaux doivent être constitués de sables et de graviers à granulométrie continue avec :

- 100% passant au tamis de 76 mm ;
- 55% ou plus passant au tamis de 4,76 mm ;
- 10 à 35% passant au tamis 0,074mm.

C'est un revêtement d'épaisseur qui varie de 7.5 à 15 cm et très exigeant en traitement c'est-à-dire une humidification continue, suivie de l'application de membranes. Ce qui lui permet de garantir un minimum de fissuration, une longue durabilité et une résistance mécanique élevée. Les joints ne sont pas nécessaires.

➤ **Revêtement en sol ciment plastique**

Il s'agit d'un mélange plus riche en ciment et en eau, ce qui lui offre les mêmes caractéristiques du béton ordinaire. Les joints de dilatation sont exécutés tous les 30 ml et les joint de retrait sont espacés de 7,5 ml.

5. Revêtement en briques

Ces revêtements sont favorables dans les régions où :

- La main d'œuvre est abondante ;
- Les matériaux pour la fabrication des briques sont disponibles à faible distance des canaux à revêtir ;
- Les matériaux et les machines qui seraient nécessaires pour d'autres types acceptables de revêtements ne sont pas disponibles à des prix compétitifs.

Il exige certaines conditions à savoir un sol bien compacté et a une faible perméabilité, une résistance mécanique élevée et des conditions d'exploitation satisfaisantes.

6. Revêtement en pierres

Le revêtement en pierres est recommandé dans les régions où on dispose des matériaux adéquats tels que le grès.

Les pertes par infiltration sont généralement considérables dans ce type de revêtement surtout si les pierres ne sont pas liées par du mortier, ainsi, ce matériaux ne supporte pas les grandes vitesses vu sa faible densité.

7. Revêtement en béton armé

Le revêtement en béton sans armatures peut être endommagé par des pressions hydrostatiques ou autres. Donc, le béton armé permet de diminuer la largeur des crevasses et d'empêcher que les plaques fissurées ne se séparent du reste de l'ouvrage. Il est utilisé lorsqu'il y a une forte pression antagonistes, une vitesse d'écoulement élevée et lorsque le sol de fondation est instable. Pour le revêtement du béton ordinaire, l'utilisation des joints transversaux est capitale pour éviter les fissurations. Par contre, le revêtement en béton armé autorise la suppression des joints de retrait.

8. Revêtement en béton d'asphaltes :

C'est un mélange d'agrégats avec des produits bitumineux solides ou semi solides obtenus à partir de la distillation du pétrole.

Le béton d'asphaltes est mélangé soit à chaud soit à froid. Les deux méthodes donnent naissance à des matériaux semblables, sauf que le béton d'asphaltes mélangé à froid, nécessite du temps pour murir ainsi que des conditions météorologiques favorables. L'étanchéité est liée principalement au degré de compactage.

Ce type de revêtement n'est recommandé pour les canaux d'irrigation que dans les zones où l'asphalte est moins cher que le ciment Portland et si les agrégats convenables sont trouvés sur place. Il possède quelques avantages qui sont la possibilité de le mettre en période de gel, d'utiliser les agrégats de qualité inférieure et aussi il s'adapte aux déformations du sol. Cependant, sa durée de vie n'est que de 10 à 20 ans. Il est adapté plus aux petits canaux car la vitesse d'écoulement ne doit pas dépasser 1,5m/s. On l'utilise lorsqu'il y a une différence notable de coût par rapport au revêtement en béton, lorsque les agrégats existant sur les lieux ne sont pas utilisables et si la main d'œuvre n'est pas disponible.

II. Revêtement par membrane

1. Membranes non enterrées :

Ces membranes sont soit de caoutchouc synthétique, de matière plastique ou en feuilles minces d'asphalte. Les pertes par infiltration sont faibles.

Ce type de revêtement est très simple à mettre en œuvre mais coûteux et se détériore après deux à quatre ans sous l'influence du soleil, de l'érosion, de perforation des plantes aquatiques, de piétinement par le bétail ou même de l'action du matériel d'entretien.

2. Membranes recouvertes :

Vu la faible résistance des membranes non enterrées à la plupart des conditions naturelles, les membranes recouvertes sont avérées comme une solution très avantageuse pour les canaux d'irrigation par rapport à la plupart des autres méthodes. Ces revêtements peuvent être mis en place pendant la saison froide ou humide.

Pour l'installation, on recommande une pente maximale des berges de 3 :1. L'épaisseur de la couche de couverture (mélange gravier + argile) varie entre 15 et 40 cm en fonction du débit véhiculé et des contraintes auxquelles le canal est soumis. La vitesse d'écoulement maximale tolérée est de 0,9m/s.

Les différents types de membranes sont : les membranes en asphalte pulvérisées sur place et enterrées, les membranes asphaltiques préfabriquées, les membranes en matières plastiques et les membranes de bentonite.

III. Revêtement en terre :

Ce type de revêtement a connu beaucoup de progrès avec le développement de la mécanique des sols, surtout avec son coût moins élevé que les autres types de revêtement.

En effet, beaucoup de considérations doivent être prise en compte pour pouvoir avoir un bon revêtement, telles que l'action du gel et de dégel, la protection contre l'érosion, le contrôle de la densité et de la teneur en eau ainsi que la vitesse admissible et la rugosité. La pente recommandée pour ce type de revêtement pour les talus est de 1,5 :1 ou moins raide.

1. Revêtement en terre compactée

Ce type de revêtement résulte généralement d'un mélange de gravier et de sable à granulométrie continue, lié par l'argile. La fonction principale d'un revêtement en terre compactée est de réduire les pertes par infiltration de telle sorte qu'elles ne dépassent pas 30 l/m³ après l'exécution du revêtement. L'épaisseur du revêtement varie de 50 à 100 cm à la pente, tandis qu'elle est de 30 à 60 cm sur le fond du lit suivant les dimensions de la section du canal à revêtir.

En effet, malgré les crevasses qui se forment quand le canal est vide et les dispositions supplémentaires à prendre au cas où le sol est trop sec ou trop humide, chose qui influence le compactage correct du sol, le revêtement en terre compactée s'avère plus économique par rapport aux autres types de revêtements. Ces avantages sont multiples dont on peut citer :

- Moyennement peu coûteux ;
- Efficacité de réduire les infiltrations au gel ;
- Assure la résistance aux pressions hydrostatiques ;
- Non nécessité de réalisation de drain sous le revêtement ;
- Utilisable avantageusement sur des argiles gonflantes.

2. Revêtement minces en terre compactée

Ce revêtement est recommandé lorsque la qualité de la terre répondue dans la région assure l'étanchéité nécessaire ou si les matériaux convenables sont éloignés. Ainsi, la meilleure manière de faire des revêtements minces en terre compactée est d'utiliser une dragline qui se déplace sur la berme du canal, et de compacter ensuite la terre déposée en le roulant transversalement depuis cette berme.

3. Revêtement en terre meuble non compactée

Ce type est réalisé avec des sols argileux d'une finesse et d'une imperméabilité considérables pour pouvoir réduire l'infiltration.

Il est vrai que le revêtement en terre meuble non compactée est très avantageux du point de vue économique, vu qu'il s'agit de décharger l'argile dans le canal et de l'étaler, mais sa durée de vie est relativement courte.

Conclusion

Le revêtement des canaux s'avère très important vu son rôle dans la réduction des pertes par infiltration, de l'érosion, de l'engorgement des terres voisines et des coûts de maintenance, sans oublier son importance pour l'élimination de mauvaises herbes.

En effet, aucun type de revêtement ne peut être recommandé pour toutes les situations, car chaque type est adéquat pour répondre à un certain nombre de contraintes telles que l'abondance des matériaux, le coût, le climat de la région, la main d'œuvre etc...

Chapitre 3 : Evaluation des pertes par infiltration dans les canaux en terre

Introduction :

L'infiltration est le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. L'infiltration a une influence sur l'hydrologie et l'hydrogéologie. C'est un bon indicateur de la qualité du sol car il y a une relation directe avec la qualité de la structure et la présence de macro pores continus dans le sol. Il peut être donné par une observation visuelle ou par des méthodes quantitatives. Dans le domaine de l'irrigation, l'infiltration génère des pertes hydriques considérables.

➤ Méthode visuelle

L'observation de la battance ou la présence de flaques d'eau au sol peut indiquer une faible capacité d'infiltration. Sur un sol d'une bonne structure les flaques d'eau peuvent disparaître en moins de 24h après de fortes pluies. Par contre, sur un sol d'une mauvaise structure, les flaques peuvent rester pendant plus d'un jour.

➤ Méthode quantitative

La capacité d'infiltration peut être déterminée en mesurant le taux d'infiltration pendant un certain temps, c'est à dire le volume d'eau infiltré par minute. Pour cela, on peut utiliser l'infiltromètre à simple anneau ou bien, l'infiltromètre à double anneau, ou l'infiltromètre de Guelph.

I. Paramètres descriptifs de l'infiltration

- **La conductivité hydraulique à saturation K_s** est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.

- **La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption** : on peut l'appeler aussi infiltrabilité, elle représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites (la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface).
- **La pluie nette** : représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. Elle est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain.
- **La percolation** : elle désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.

II. Facteurs influençant l'infiltration

L'infiltration est conditionnée par plusieurs paramètres du sol qui ont un impact sur la vitesse d'infiltration. Ces facteurs sont :

- **La hauteur de l'eau dans le canal** : la croissance de cette hauteur génère une augmentation des pertes par infiltration. Plus la hauteur est importante, plus on a des pertes par infiltration.
- **Type de sol** : Il s'agit de la structure, la texture et la porosité. Les caractéristiques de la matrice sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.
- **La perméabilité de l'eau dans le sol** : c'est un facteur important qui dépend à la dimension des pores et de la porosité du sol.
- **La compaction de la surface du sol** : Elle est due à l'utilisation de lourdes machines, l'impact des gouttes de pluie ou d'autres effets comme l'effet thermique ou anthropique (par l'homme). Les conséquences peuvent être la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur et la dégradation de la structure de la couche de surface du sol.
- **La topographie** : une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.

- **Le débit d'alimentation**
- **La teneur en eau initiale du sol** : les forces de succion sont en fonction du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide.
- **La vitesse** : la vitesse de l'infiltration dépend de plusieurs facteurs parmi eux, on peut citer les caractéristiques du sol, la hauteur d'eau dans le canal (le périmètre mouillé et la profondeur jusqu'aux eaux souterraines) et la qualité des matériaux.

Des corrélations faites ont prouvé la croissance des pertes par infiltration quand on note une différence entre le niveau de l'eau dans le canal et le niveau de la nappe phréatique. Ainsi, ces corrélations ont montré que la répartition des pertes par infiltration du canal via le fond et les talus dépend de la position de la nappe. Lorsque cette dernière se trouve à une faible profondeur, la contribution des talus du canal est plus grande que celle du fond du canal. (BOUWER, 1969)

III. Les méthodes d'évaluation des pertes par infiltration

1. Les formules empiriques

Les formules empiriques sont très nombreuses et ne donnent que des approximations grossières. Parmi ces formules, on cite :

- **Formule de Davis et Wilson**

$$S_l = \frac{0.45 \times C \times P_w \times L \times (H_w)^{\frac{1}{3}}}{4 \times 10^6 + 3650 \times \sqrt{v}}$$

Avec :

S_L : perte par infiltration (m^3/j)

P_w : périmètre mouillé (m^2)

H_w : hauteur d'eau dans le canal (m)

L : longueur du canal (m)

V : vitesse d'écoulement (m/s)

C : constante dépendant du mode de revêtement

Tableau1. 3: Valeurs de C en fonction du type de revêtement (Kraatz, 1977)

Type de revêtement	Epaisseur du revêtement (cm)	Valeur de C
Béton	10	1
Argile compacté	15	4
Asphalte léger	-	5
Argile	7,6	8
Mortier de ciment	-	10

- **La formule de Moritz**

$$S=0.2 \times C \times \frac{\sqrt{Q}}{V}$$

Avec :

S : pertes par infiltration (m³/s)

Q : débit (m³/s)

V : vitesse d'écoulement (m/s)

C : constante dépendant du type de sol

Tableau1. 4: Valeurs de C en fonction du type de sol (Kraatz, 1977)

Type de sol	Valeur de C
Gravier cimenté et hardpan avec limon sableux	0.34
Argile et limon argileux	0.41
Limon sableux	0.66
Cendres volcaniques	0.68
Sable ou argile	1.20
Sol sableux avec pierres	1.68
Sol sableux et graveleux	2.20

- **Formule indienne (1967)**

$$S = C \times A \times D$$

Avec :

S : pertes totales par infiltration (m^3/s)

A : surface du périmètre mouillé (Mm^2)

D : hauteur d'eau dans le canal (m)

C : constante variant entre 1.1 et 1.8

- **Formule égyptienne de Molesworth et Yennidumia**

$$S = C \times L \times P \times \sqrt{R}$$

Avec :

S : pertes en transport (m^3/s pour une longueur L du canal)

L : longueur du canal (km)

P : périmètre mouillé (m)

R : rayon hydraulique moyen (m)

C : coefficient dépendant de la nature et de la température du sol ; $c = 0.0015$ pour l'argile et $c = 0.003$ pour le sable

- **La Formule russe :**

$$S = \frac{1.16 \times K \times q_r}{Q}$$

Avec :

S : pertes par l'infiltration sous forme de pourcentage du débit du canal par Km de longueur du canal

Q : débit du canal (m^3/s)

K : perméabilité saturée (m/j)

q_r : perte par infiltration réduite ; c'est-à-dire rapport vitesse des infiltrations/perméabilité saturée du matériau du lit.

- **Formule d'Offengenden pour les canaux en terre**

$$S = \frac{s \times Q}{100}$$

Avec :

S : pertes totales en eau (m^3)

s : pertes en eau par Km de longueur du canal

l : longueur du canal (Km)

Q : débit du canal (m^3/s)

2. Méthodes utilisées pour la mesure des pertes par infiltration dans les canaux

➤ La méthode par débit entrée et de sortie

Cette méthode consiste à mesurer les volumes d'eau entrant et sortant dans un tronçon d'un canal. La différence entre ces deux volumes est égale aux pertes par infiltration en négligeant l'évaporation. Les fuites et les dérivations dans le canal doivent être prises en considération et veiller à maintenir le niveau dans le canal stable.

$$S = V_1 - V_2$$

Avec :

S : Pertes totales en eau en (m^3)

V_1 = volume d'eau entrant

V_2 = volume d'eau sortant

➤ La méthode par bassin fermé

Cette méthode consiste à mesurer la vitesse de la baisse de niveau dans un bassin constitué par le tronçon de canal à contrôler. Cette mesure va servir pour calculer la vitesse des infiltrations et le rapport entre la surface de l'eau du bassin et la surface mouillée correspondante. Les résultats obtenus devraient fournir une bonne indication des pertes moyennes provenant de l'ensemble du tronçon. Pour isoler un tronçon de canal en vue d'essais en bassin fermé, il faut construire des digues ou des batardeaux étanches. Pour ce

faire, on utilise des limnimètres où des échelles limnométriques enfoncées dans le lit du canal. Et afin d'avoir des résultats précis et de pouvoir apporter les corrections voulues aux mesures relatives aux infiltrations, il est nécessaire de prendre en considération toutes les fuites pouvant exister sur l'ouvrage ainsi que les valeurs de l'évaporation et des précipitations.

On utilise la formule suivante pour calculer les pertes par infiltration :

$$S = \frac{W \times L (d_1 - d_2)}{P \times L}$$

Avec :

S: infiltration moyenne en $m^3/m^2/24$ heures sur la distance L ;

W : largeur moyenne du bassin fermé en (m) ;

d₁: hauteur de l'eau (m) au début de la mesure ;

d₂: hauteur de l'eau (m) après 24 heures.

P : périmètre mouillé (m)

La méthode de la détermination des pertes par bassin fermé fournit des résultats précis. Cependant, elle a plusieurs inconvénients tels que la nécessité de construire des digues ce qui engendre des dépenses élevées ainsi que l'absence de toute indication sur la répartition des pertes et l'interruption du fonctionnement normal du canal.

➤ **La méthode utilisant du jaugeage par moulinet hydrométrique**

Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit. La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps). La fonction $v = f(n)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Suivant le mode opératoire adopté pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide ou sur un lest profilé appelé "saumon". La

méthode des deux points convient surtout pour les canaux de grande section ; elle consiste à mesurer la vitesse de l'eau à 20 et à 80% de la profondeur à partir de la surface de l'eau, et à utiliser la moyenne, cette méthode donne des résultats très précis, la méthode des six dixième consiste à mesurer la vitesse de l'eau à 60% de la profondeur par rapport à la surface de l'eau, on l'emploie pour les écoulements peu profonds pour lesquels la méthode précédente ne serait pas applicable. Elle donne des résultats assez satisfaisants (**Kraatz, 1977**).



Figure1. 3: Moulinet hydrométrique

3. Méthode par mesureur de perte par infiltration

Le mesureur de pertes par infiltration est une variante modifiée d'une perméamétrie à charge constante, qui est utilisé en-dessous du niveau de l'eau. Les deux importants types d'appareils pour effectuer ce type de mesure sont :

- **Mesureur de pertes par infiltration au moyen d'un sac à eau en plastique immergé :**

Ce dispositif consiste en une coupelle renversée, étanche, raccordée par un tuyau souple à un sac en plastique flottant à la surface de l'eau (**Planbleu, 2009**).

L'eau s'écoule du bac dans la coupelle et de là, s'infiltré dans la partie sous-sol du canal qui a été isolée par celle-ci. Si l'on maintient le sac immergé, il s'adaptera de lui-même à la diminution du volume d'eau, de sorte que les pressions exercées par l'eau sur les surfaces situées à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle soient égales. On pourra alors calculer la vitesse d'infiltration d'après le poids d'eau perdu pendant une période de temps déterminé et la surface recouverte par la coupelle.

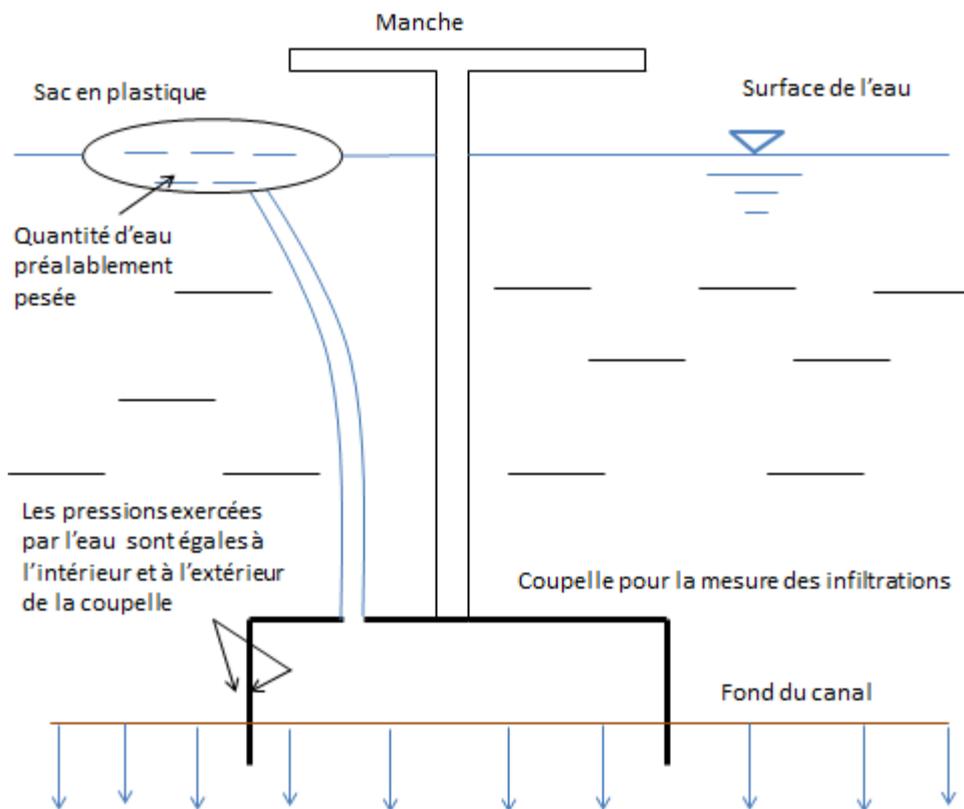


Figure1. 4: Dispositif de mesure des pertes en eau par un sac en plastique (Kraatz, 1977)

➤ **Mesureur d'infiltration à baisse de niveau :**

Il est malgré tout difficile de maintenir à l'intérieur de la coupelle une pression exactement égale à celle du canal, et c'est pourquoi on utilise une autre méthode, dite à baisse de niveau, dans laquelle la coupelle est reliée à un réservoir à niveau variable.

Avant de mesurer les pertes par infiltration, on élève le niveau dans le réservoir, mesuré au moyen d'un manomètre constitué d'un tube en forme de U inversé, qui est raccordé à une

pompe à vide installée sur le bord du canal. Une des branches du manomètre est raccordée à l'intérieur de la coupelle, et l'autre est reliée à l'eau libre dans le canal. Le niveau de l'eau dans la branche reliée à l'eau libre va monter. Cependant, la différence entre les niveaux d'eau dans les deux branches du manomètre est toujours égale à la différence de pression entre la coupelle et le canal à l'extérieur de celui-ci, même si le niveau de l'eau du canal subit des variations au cours des mesures.

Les opérations sur le terrain consistent à faire des lectures de temps et à mesurer des niveaux sur le manomètre. Ces données permettront ensuite de calculer les pertes par infiltration, soit graphiquement, soit par une méthode analytique.

4. Méthodes spéciales

➤ Méthode par étalonnage électrique ou par mesure de la résistivité

En partant du principe selon lequel la résistance électrique d'un sol varie avec sa teneur en sels dissous dans l'eau, la méthode consiste à obtenir une bande d'un enregistrement continu des variations de la résistance et de la tension électrique naturelle des matériaux du sol d'un point à un autre le long du fond ou des côtés d'un canal. Si cette tension naturelle ne varie que très peu d'un point à un autre dans le matériau entourant le canal, on considère que celui-ci est étanche, ou tout au moins qu'il n'y a guère d'infiltration. Dans le cas contraire, les pertes par infiltration peuvent être assez élevées dans le tronçon correspondant.

➤ Relevés piézométriques :

L'observation des niveaux de l'eau dans une série de tubes piézométriques placés sur une ligne perpendiculaire à l'axe central d'un canal fournit des données permettant de déterminer les lignes d'écoulement et les lignes équipotentielles de l'eau infiltrée. On peut en déduire par le calcul le volume des infiltrations, lorsque la perméabilité du sol a pu être déterminée. Les pertes par évaporation dans une nappe située à une profondeur supérieure à 1.50m sont négligeables, et il est possible de tenir compte des autres écoulements qui se produisent depuis les eaux souterraines en direction du drainage naturel. L'élévation de la nappe phréatique, après remise en service d'un canal qui a été asséché pendant une longue période, peut également donner une idée de l'importance des infiltrations qui surviennent à ce moment.

➤ **Détection à distance :**

Ce terme a été associé à toutes sortes d'enregistrement de données au moyen de capteurs qui mesurent l'énergie émise. Parmi la douzaine de types de capteurs utilisables jusqu'à présent, les appareils d'exploration d'ondes infrarouges et les radars semblent être les plus capables de compléter les indications obtenues par photographies aériennes pour la détection et l'évaluation des problèmes d'infiltration. Il est possible que les modifications auxquelles on procède actuellement sur ces appareils, ainsi qu'une plus grande précision dans leur étalonnage, puissent permettre d'obtenir des renseignements sur les vitesses d'infiltration. Des recherches très poussées sur l'application de la détection à distance dans les divers domaines de l'agriculture, y compris les questions d'infiltration, sont actuellement en cours. (Kraatz, 1977).

IV. Quelques études faites sur réduire les pertes par infiltration

1. Méthodes utilisées dans les canaux d'irrigation au Sud d'Alberta

Les méthodes de mesure du taux d'infiltration utilisées sont : la méthode d'entrée et de sortie et la méthode de filtrage par mètre (test de flaque).

La première est considérée comme la plus avenue. Elle implique la construction de poly lignes dans les deux bouts du canal. L'étendue est remplie d'eau jusqu'à une profondeur opérationnelle et la baisse du niveau de l'eau est enregistrée pendant plusieurs jours. L'infiltration est ajustée pour les précipitations et l'évaporation.

Les objectifs visés pour cette étude sont de:

- Déterminer le taux d'infiltration par unité suivant la texture du sol (fine, moyenne, grossier) basé sur les résultats des tests des flaques dans différents niveaux des canaux d'irrigation avec la variété des conditions du sol ;
- Déterminer l'étendue et la taille des canaux dans chaque un des trois niveaux de la texture à travers les districts d'irrigation ;
- Estimer le volume total de fuite dans les 13 districts

Les tests des flaques ont été effectués dans 11 districts d'irrigation au sud d'Alberta afin de déterminer les taux d'infiltration dans les sols de différentes textures. Ces taux ont été déterminés pour trois groupes de sol : fin, moyenne et grossier.

Les résultats ont indiqué que les pertes par infiltration sont moins importantes que les estimations d'avant. Les estimations effectuées ont indiqué qu'environ 15% du total d'allocation ont été perdus au niveau des canaux d'irrigation des districts, alors que le volume d'eau perdu par fuite dans les districts d'irrigation en 1999 était de 91.10^6 m^3 , ou 0.25% du total d'allocation proposé dans la régulation de 1991. La réhabilitation des canaux a joué un rôle significatif dans la réduction des fuites en faisant des pertes par infiltration un facteur négligeable dans les opérations des canaux.

2. Application de Polyacrylamide (PAM) pour réduire l'infiltration de l'eau à travers les canaux sans doublure.

L'inspection géologique des Etats-Unis a estimé que 50% de l'eau pouvaient être perdus par infiltration dans le fond des canaux ou des parois latéraux. Le grand poids moléculaire, linéaire, anionique de polyacrylamide (PAM) est pris en tant que moyen de réduction de des fuites ou des pertes par infiltration.

Faisant partie des études financées par le Bureau d' Assèchement des Etats-Unis (US Bureau of Reclamation, USBR). Yang et Moran ont quantifié le PAM optimal et les concentrations de sédiment suspendues (SSC) qui réduisent plus efficacement la conductivité hydraulique saturée des colonnes de sols au laboratoire. Ces résultats montrent que le traitement avec le PAM réduit le conductivité hydraulique saturée K_s de 40% à 98% dans les textures sableux sableuses, dépendant du SSC mais les réductions ont été plus faibles dans les sols argileux qui sont comprises entre 0 à 56%. Les résultats montrent que la combinaison du PAM et du SSC réduisent K_s entièrement des colonnes de sol de 8 à 11 fois plus que le rajout de PAM sans suspension de sédiment (SSC).

3. Gainage des canaux :

Ce genre de gainage inclut le béton standard, du sable compacté, des géomembranes exposés, ciment du sol, géocomposite, etc.

Le gainage par choix est du gravier compacté et du sable avec du classeur d'argile ou du gravier pauvre en teneur, de la texture de sable argileux avec un minimum d'épaisseur de 2 pas (pieds) normaux à la fin du prisme du canal, si disponible à travers une prise de distance économique. S'ils sont proprement maintenus ces gainages offrent de d'excellents contrôles.

Les pertes par infiltration seraient réduites théoriquement de 1,8 à 3,7 m³ /Mm² pour un canal sans gainage dans un sol sableux. Pour un sol argileux on aura une réduction de 0,6 m³/Mm² pour un canal doublé. En 1988 une étude de performance montre que des défluentés doublés perdaient 3,5 m³/Mm² et les cours d'eau en perdaient que 3,7 m³/Mm².

4. La méthode de test Pouding

. Dans cette méthode deux bouts d'un canal sont fermés et scellés (avec des barrages de sable) pour créer une flaque d'eau. Le changement du niveau d'eau est mesuré au-delà de 24h à 48h et utilisé le long de la dimension du canal. Le test est de PONDING sont classifiés comme soit des tests de perte par fuite soit des tests de pertes totales

TESTS DE PERTES PAR FUITE : ils mesurent les pertes à travers le fond et les côtés des canaux. Les courts segments des canaux sont souvent utilisés.

TESTS DE PERTES TOTALES: ils sont conduits dans les segments des canaux qui contiennent des valves, barrière, et d'autres structures qui peuvent contribuer à la mesure des pertes.

Conclusion

Les pertes par infiltration peuvent créer beaucoup de problèmes, notamment:

- La réduction des débits de l'eau livrés aux agriculteurs ;
- L'augmentation des problèmes de drainage, causant éventuellement une diminution de rendement des cultures ainsi que des problèmes de leur santé;
- La contamination des aquifères si l'eau est saline.

La solution la plus courante pour réduire les infiltrations est le revêtement des canaux. Cette option apportera avec elle des avantages supplémentaires, tels que la stabilisation des talus, etc.

Chapitre 4 : Modélisation de l'infiltration

L'infiltration est le passage de l'eau à travers la surface du sol. C'est ce phénomène qui contrôle plusieurs processus en hydrologie comme le ruissellement, la percolation profonde et l'humidification des sols. Ainsi les paramètres suivants liés à l'infiltration sont :

Le taux d'infiltration (f) : c'est la quantité totale d'eau qui s'infiltré dans le sol par unité de temps (mm/h) : le taux d'infiltration est en effet le flux entrant à la surface du sol.

Masse infiltrée (F) : c'est la quantité totale d'eau infiltrée dans le sol pour une période de temps donnée (mm).

Capacité d'infiltration (f_{max}) : c'est le taux maximum d'infiltration que permet un sol donné (mm/h).

Cependant, avec les expérimentations faites pour déterminer ces paramètres, il est plus utile de présenter les résultats d'infiltration sous forme d'une courbe cumulative de la quantité totale d'eau qui est la courbe d'infiltration de masse. Pour bien comprendre cela, plusieurs scientifiques se sont penchés sur ces questions et plusieurs modèles ont été adoptés.

I. Modèles basés sur la masse infiltrée

Ces modèles décrivent la capacité d'infiltration en fonction de la masse infiltrée.

1. Modèle de Holtan (1961)

Holtan a proposé une expression mathématique de la capacité d'infiltration en fonction de l'épuisement de l'emmagasinement de l'humidité dans le sol :

$$f_{max} = a \times (S - F) \times n + f_c$$

Avec:

S = volume potentiel d'emmagasinement ou différence volumétrique entre la saturation et le point de flétrissement dans la zone située au-dessus de la couche de contrôle (m^3)

F = masse d'eau infiltrée ou déjà emmagasinée dans le sol (mm)

f_c = taux d'infiltration final constant de l'horizon de contrôle (mm/h)

a, n = constantes dépendant du sol, $n \approx 0,5$

2. Modèle de Green- Ampt (1911)

Cette loi s'applique à des milieux homogènes et profonds et des profils d'humidité initialement uniformes. La charge appliquée en surface doit être constante. Elle utilise les hypothèses suivantes :

- le front mouillant est bien défini et sépare la zone humide de la zone sèche ;
- le profil est saturé au-dessus du front mouillant ;
- l'infiltration est contrôlée par la vitesse de transmission de Darcy.

Ce modèle est obtenu se basant sur les hypothèses suivantes :

- les profils d'humidité sont des profils « pistons », ce qui revient à dire que la courbe de rétention $\Theta(h)$ est une fonction échelon :
 - $\Theta = \Theta_s$ pour $h > H_f$
 - $\Theta < \Theta_s$ pour $h \leq H_f$, H_f étant la pression au niveau du front
- la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau $K(\Theta)$ est une masse de Dirac
 - $K = K_s$ pour $\Theta = \Theta_s$,
 - $K = 0$ pour $\Theta < \Theta_s$, Θ_s étant la teneur en eau à saturation.

Ainsi en utilisant la loi de Darcy, la capacité d'infiltration qui correspond au flux d'eau entrant à la surface du sol s'écrit alors :

$$f_{max} = q = -K_s \frac{(H_2 - H_1)}{L_f}$$

K_s = conductivité hydraulique saturée ;

H_1 = potentiel à la surface du sol (m)

H_2 = potentiel au front mouillant (m)

Le niveau de référence étant à la surface du sol, les potentiels peuvent être définis et la capacité d'infiltration s'écrit alors :

$H_1 = d$ = épaisseur de la lame d'eau à la surface du sol ;

$$H_1 = h_f - L_f$$

h_f = pression au front mouillant

$$f_{max} = q = -K_s \frac{(h_f - L_f - d)}{L_f}$$

Si $h_f = -S_f = -$ succion, la capacité d'infiltration peut s'écrire alors

$$f_{max} = K_s \frac{(S_f - L_f - d)}{L_f}$$

A n'importe quel moment, la masse infiltrée F est égale à :

$$F = (\theta_{sat} - \theta)L_f = \Delta\theta * L_f$$

Ce qui entraîne :

$$L_f = \frac{F}{\Delta\theta}$$

Si l'épaisseur de la lame d'eau est très petite $d \ll S_f + L_f$, alors d devient négligeable :

$$f_{max} = K_s + K_s * S_f \frac{\Delta\theta}{F}$$

En réalité la teneur en eau au-dessus du front mouillant n'est pas saturée mais presque à l'état de saturation, l'écoulement est presque saturé $K < K_s$, la teneur en eau initiale n'est pas uniforme sur le profil et la teneur en eau initiale est différente d'un essai à l'autre (Musy et Soutter, 1991).

La forme générale de ce modèle devient alors :

$$f_{max} = B + \frac{A}{F}$$

A, B = constantes dépendantes des conditions initiales et du type de sol

$$A = K_s * S_f * \Delta\theta$$

$$B = K_s \text{ ou } f_c$$

Si $G = 1/F$ alors l'équation devient :

$$f_{max} = A * G + B$$

II. Equations basées sur le temps

Ces types de modèles regroupent les équations qui expriment la diminution de la capacité d'infiltration en fonction du temps.

1. Gardner, Widstoe (1921) et Horton (1940)

Gardner et Windstoe (1921) et Horton (1940) utilisent l'hypothèse suivante : la réduction du taux d'infiltration correspond à un processus d'épuisement ; ce qui signifie que le taux de travail est proportionnel à la quantité de travail qui reste à faire. Dans le cas du processus d'infiltration, le travail qui reste à accomplir à un certain moment "t" est celui qui est nécessaire pour modifier le taux d'infiltration de sa valeur actuelle "f" à sa valeur finale "f_c" (f_{max} --> f_c). Comme la vitesse de travail est associée à la dérivée de la capacité d'infiltration par rapport au temps et comme la capacité d'infiltration diminue avec le temps, la dérivée est négative et s'exprime par la relation (Gray, 1972 ; Llamas, 1993) :

$$\frac{\partial f_{max}}{\partial t} = -k(f_{max} - f_c)$$

k étant la constante de proportionnalité

L'intégration de l'équation sous forme d'une intégrale indéfinie donne

$$\ln(f - f_c) = k_t + C_1$$

Mais à t= 0, f=f₀ et l'équation devient

$$\frac{dF}{dt} = f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

L'intégration de cette équation pour t =0 quand F =0 donne :

$$F = f_{ct} + \frac{1}{k_s} * (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt})$$

Cette dernière équation est parfois représentée sous la forme suivante, forme qui n'est pas équivalente :

$$F = f_{ct} + d * e^{-kt}$$

2. Kostiakov (1932), Lewis (1937)

L'équation de Kostiakov et Lewis a été développée expérimentalement :

$$F = at^n$$

$$f_{max} = ant^{n-1}$$

a et n sont des constantes déterminées expérimentalement à partir d'un graphique représentant log(F) en fonction de log(t).

Avec ces équations, la capacité d'infiltration tend vers une valeur nulle lorsque le temps devient très grand. Les modèles de Kostiakov et Lewis sont utilisés dans les études d'irrigation où les applications d'eau ne sont généralement pas faites sur de longues périodes alors que le modèle de Gardner et Windstoe (1921) et Horton (1940) est plus utilisé dans les études de bassins versants car il tient compte des taux minimales d'infiltration qui existent lorsqu'on a de grandes périodes de temps. (Gray, 1972).

3. Kirkham et Feng (1949)

Les auteurs ont trouvé qu'on pouvait utiliser ce modèle pour décrire le volume d'eau absorbée horizontalement dans une colonne de sol séchée à l'air, sous l'effet des forces capillaires, l'échantillon étant placé au contact d'une surface d'eau libre. Cette expérience est valide dans le cas où l'entrée de l'eau est relativement peu affectée par la force de gravité. Dans ce cas, on peut supposer que F est pratiquement proportionnel à $(t)^{1/2}$. Dans les sols humides et les sables, la gravité a plus d'effets sur l'écoulement et F tend à être proportionnel à t. (Gray, 1972).

$$F = C\sqrt{t} + a$$

$$f_{max} = \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} * C \div \sqrt{t}$$

a et C sont des constantes déterminées expérimentalement et la valeur de a est faible.

4. Philip (1957).

Ce modèle est obtenu à partir de la solution analytique de l'équation de l'infiltration de Philip (1957), dans le cas monodimensionnel vertical, en série entière en $(t)^{1/2}$, limitée aux deux premiers termes. Elle s'applique à des sols homogènes dont le profil d'humidité initiale est uniforme et pour une charge constante appliquée en surface. Il tient en compte les forces de gravité et capillaires. L'équation de Philip (1957) décrit la masse d'eau absorbée dans une colonne de sol préalablement séchée et où les forces capillaires et de gravité agissent :

$$F = S(t)^{\frac{1}{2}} + At$$

$$f_{max} = \frac{S}{2\sqrt{t}} + A$$

A, S : constantes déterminées expérimentalement par régression linéaire.

S : exprime la capacité plus ou moins grande que possède le sol à absorber l'eau par capillarité.

A est un paramètre ayant les dimensions d'une vitesse, qui est de l'ordre de $K_s/3$ à $2K_s/3$, K_s étant la conductivité du sol à la saturation. On notera que la relation entre K_s et A n'est pas établie théoriquement. (Gray, 1972).

Avec ces équations, on peut dire que la variation du taux d'infiltration diminue selon l'inverse de la racine carré du temps. Toutefois, il serait nécessaire d'évaluer dans l'application des équations d'infiltration, les coefficients et les exposants à l'aide d'essais in situ ou au laboratoire.

Chapitre 5: Rappel des travaux faits sur l'évaluation de l'efficacité et la granulométrie des sols de Jorf-Erfoud

I. L'évaluation de l'efficacité des canaux in situ

1. Canaux en terre

Les mesures sont faites sur les canaux en terre de section plus ou moins homogène qui n'ont pas de prises et qui sont mises en eau au moment des mesures. Les tableaux suivants représentent les résultats de calcul de débit, de l'efficacité et des pertes des tronçons de séguia étudiés.

✓ **Cas de la séguia Lgdima :**

Tableau1. 5: Résultats de calcul des pertes en eau dans la séguia Lgdima (Ennabbagui, 2015)

Section de mesure	Débit (l/s)	Longueur du tronçon testé (m)	Efficacité (%)	Pertes (%)	Pertes A-B (%)	Pertes A-C (%)
A	25	50	70	30	30	53
B	17					
C	12	50	67	33		

✓ **Cas de Hanabou.**

Tableau1. 6 : Résultats de calcul des pertes en eau dans le séguia Hanabou (Ennabbagui, 2015)

Section de mesure	Débit (l/s)	Longueur du tronçon testé (m)	Efficiéce (%)	Pertes (%)	Pertes A-B (%)	Pertes A-C (%)	Pertes A-D (%)
A	16	50	71	29	29	50	67
B	11						
C	8	50	71	29			
D	5	50	66	34			

Ainsi, les graphes ci-dessous montrent l'évolution des pertes en fonction de la distance parcourue.

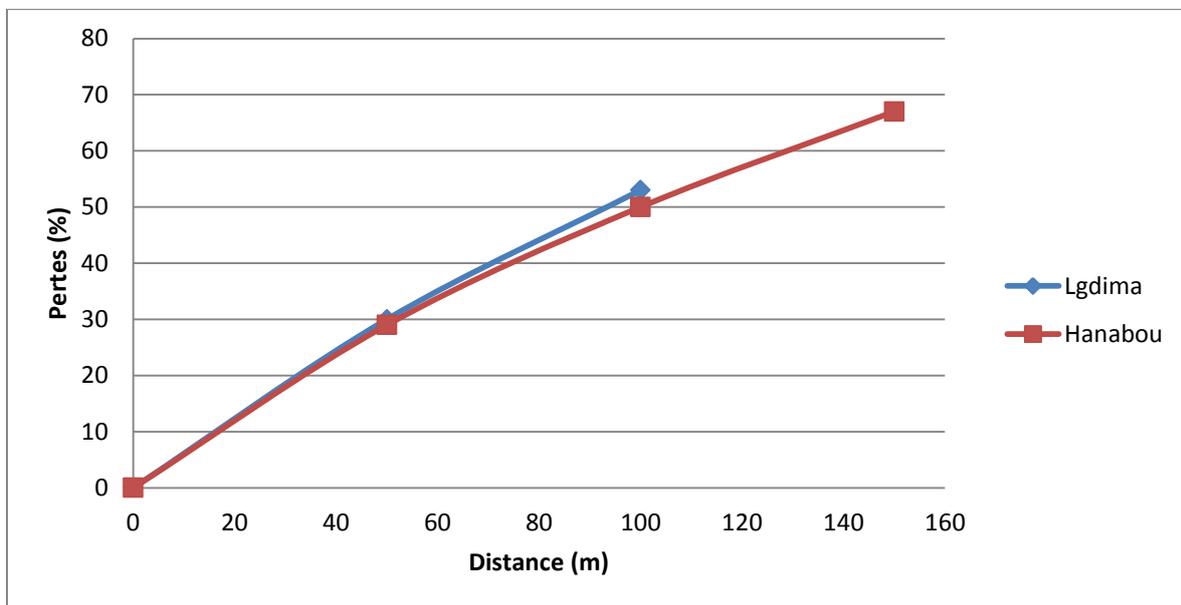


Figure1. 5:Pertes en eau dans la séguia Hanabou et Lgdima (Ennabbagui, 2015)

2. Séguias bétonnées :

✓ Cas de la séguia de Lhart Jdid

Tableau1.7: Résultats de calcul des pertes en eau dans la séguia Jdid (Ennabbagui, 2015)

Section de mesure	Débit (l/s)	Longueur du tronçon testé (m)	Efficience (%)	Pertes (%)	Pertes (A-B) (%)	Pertes (A-C) (%)	Pertes (A-D) (%)
A	14	100	90	10	10	31	36
B	12						
C	10	100	77	23			
D	9	100	92	8			

Ainsi, le graphe ci-dessous montre l'évolution des pertes en fonction de la distance parcourue.

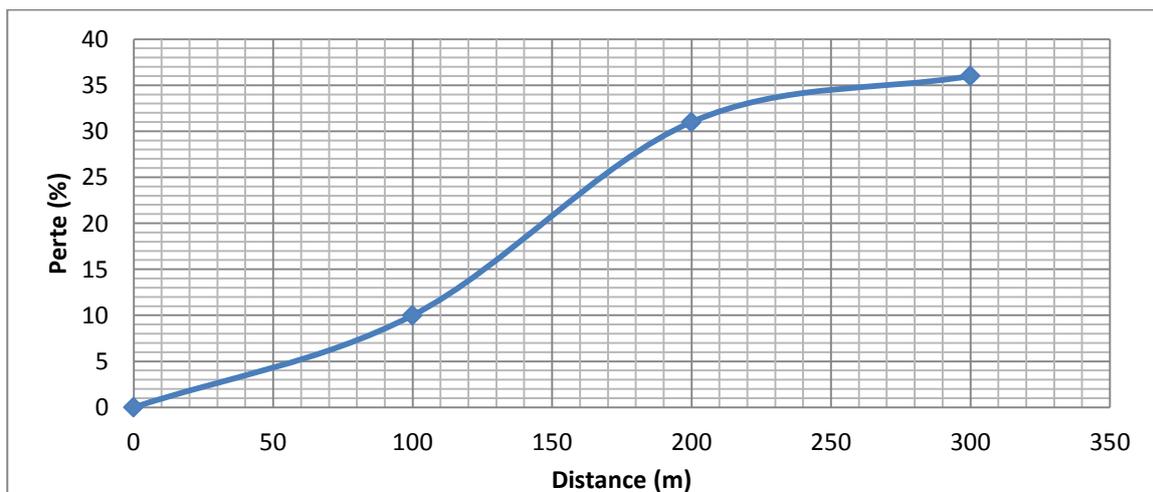


Figure1. 6: Pertes en eau dans la séguia Jdid (bétonnée) (Ennabbagui, 2015)

D'après les tableaux ci-dessus, on remarque que les pertes dans les canaux d'irrigation sont importantes ce qui peut être expliqué par un taux élevé d'infiltration au sein de ces canaux.

Les pertes moyennes dans ces séguias sont de l'ordre de :

Tableau1.8 : Pertes en eau moyennes dans les séguias en terre (Ennabbagui, 2015)

Séguias	Lgdima	Hanabou
Pertes moyennes (%)	32	31
Pertes moyennes (m³/j)	567	310
Pertes moyennes (m³/m²/j)	19	7

Les pertes en eau dans la séguia Jdid sont de l'ordre de 35% ce qui peut être expliqué par la présence de plusieurs dégradations.

Conclusion

Les pertes dans les canaux d'irrigation sont considérables cela peut être expliqué par :

- ✓ Le pourcentage faible des particules fines du sol.
- ✓ La présence ou l'absence des végétations ;
- ✓ La vitesse moyenne ;
- ✓ La géométrie des canaux qui est très variable.

Les résultats obtenus montrent que les pertes en eau dans les canaux d'irrigation en terre sont importantes. Et donc, pour une utilisation efficace de l'eau d'irrigation, il faut insister sur la nécessité d'appliquer des solutions telles que le revêtement des canaux ou la réhabilitation de ces derniers pour remédier à ce problème et afin d'améliorer l'efficacité de ces canaux.

Partie 2 : Méthodologie

Chapitre 1 : Présentation du périmètre de Jorf-Erfoud

I. Milieu physique

1. La Situation géographique

Les communes de Jorf-Arfoud sont situées à l'extrême Est du Maroc. Elles font parties de la province d'Errachidia.

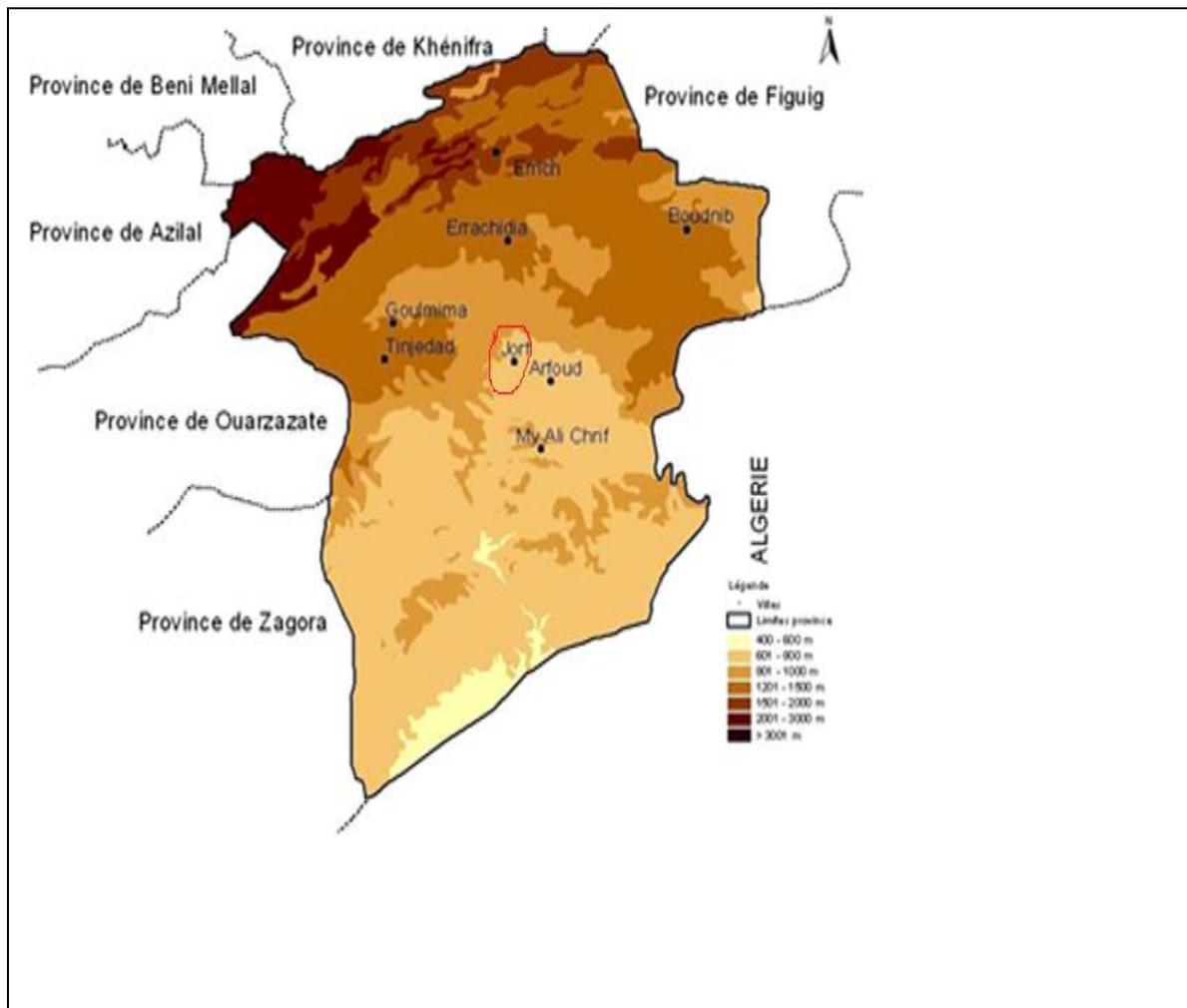


Figure2. 1:Carte de la situation géographique de la zone de Jorf

2. Le climat

La pluviométrie moyenne dans la région ne dépasse pas 100 mm/an, avec une température moyenne annuelle de 28 °C, un maximum de 42 °C en juillet et un minimum de 2°C en

janvier. En général, le climat est saharien avec un hiver froid et deux saisons humides qui sont le printemps et l'automne.

3. Les sols

Les sols les plus répandus dans la région (notamment dans les palmeraies) sont des sols peu évolués, composés de matériaux sablo-limoneux, limono-sableux, argilo-limoneux et limono-argilo-sableux d'apports alluvionnaires, moyennement à fortement calcaires et pauvres en matières organiques. Ils reposent souvent en profondeur sur les cailloutis des oueds ou sur des schistes, et sont exposés au danger de la salinité.

II. Ressources en eau

4. Ressources souterraines

La nappe se situe à 20m de profondeur environ et elle est alimentée par les eaux superficielles des crues des oueds, ainsi que par les écoulements des contreforts de l'Anti-Atlas. Les eaux apportées par ces oueds sont de bonne qualité, peu salées, ce qui permet de diminuer la salinité de la nappe alluviale. L'infiltration à partir du réseau d'irrigation et des terres irriguées participe également à la recharge de la nappe. Comme les autres unités d'aquifères de la région, le niveau de cette nappe a baissé au cours des 30 dernières années, du fait à la fois d'une baisse de la recharge mais également du fait d'une surexploitation par les puits à motopompe. D'autre part, les eaux de la nappe sont de plus en plus chargées en sel, à des taux voisins de 7g/l, ce qui met en péril l'équilibre écologique des palmeraies et compromet leur pérennité.

5. Ressources de surface

Les eaux superficielles sont les eaux des précipitations et les eaux des crues des oueds, mobilisées par 4 barrages dans la région. Les oueds de la région sont des cours d'eau temporaires, dont le régime d'écoulement est conditionné par les précipitations (irrégulières et parfois violentes) et par la topographie du bassin versant. Le site d'étude est concerné par deux oueds : l'Oued Ghris et l'Oued Batha. L'Oued Ghris, qui draine les massifs du Haut-Atlas par un réseau hydrographique étendu sur près de 3000 km², s'écoule à travers les vastes plateaux sahariens. L'oued a un régime de crues violent et soudain, dû à des averses brèves de forte intensité.

Chapitre2 : Méthodologie

La rareté de l'eau due au climat aride de la région de Jorf-Erfoud, de la pluviométrie irrégulière et variable et de l'augmentation croissante de la demande, interpelle les spécialistes de la matière. Ainsi le Département de Eau Environnement et Infrastructure de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II conduit actuellement des recherches sur l'amélioration de l'utilisation de l'eau d'irrigation. C'est dans ce contexte que des études sur les pertes par infiltration dans les séguias ainsi que sur la possibilité de la réduction de ces pertes, ont été lancées pour permettre la valorisation et la rentabilisation de l'eau agricole. La réhabilitation des réseaux traditionnels des périmètres de PMH c'est-à-dire le revêtement des canaux demeure une nécessité mais avec des moyens et des matériaux disponibles moins chers.

Pour ce faire, la méthodologie adoptée est la suivante :

- Recherche bibliographique ;
- Essai au laboratoire ;
- Analyses et interprétations de résultats obtenus.

I. Recherche bibliographique :

C'est une sorte de synthèse des travaux réalisés antérieurement et les articles en rapport avec le sujet. Cette partie est constituée de 4 chapitres qui sont la Petite et Moyenne Hydraulique, le revêtement des canaux, l'évaluation des pertes par infiltration dans les canaux en terre et la modélisation de l'infiltration. Cela a été possible via le centre de documentation agricole, la bibliothèque du Département Eau, Environnement et Infrastructures, les mémoires réalisés sur ces thématiques, les sites internet et certains documents fournis par la Direction d'Irrigation et de l'Aménagement de l'Espace Agricole.

II. Essais de laboratoire :

1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique déjà effectuée sur cette zone a donné les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau2. 1: Résultats de l'analyse granulométrique des sols composant les séguias du périmètre de Jorf-Erfoud (Ennabbagui, 2015)

Echantillon	sable grossier (%)	sable fin(%)	limon grossier(%)	Limon fin (%)	argile(%)
Hanabou	3,7	58,9	13,3	10,7	13,5
Jdid	6,5	51,7	13,2	16,6	12
Lgdima	1,9	49,1	13,4	17,2	18,4

A partir des résultats obtenus ci-dessus, la courbe granulométrique pour les quatre échantillons étudiés a été tracée :

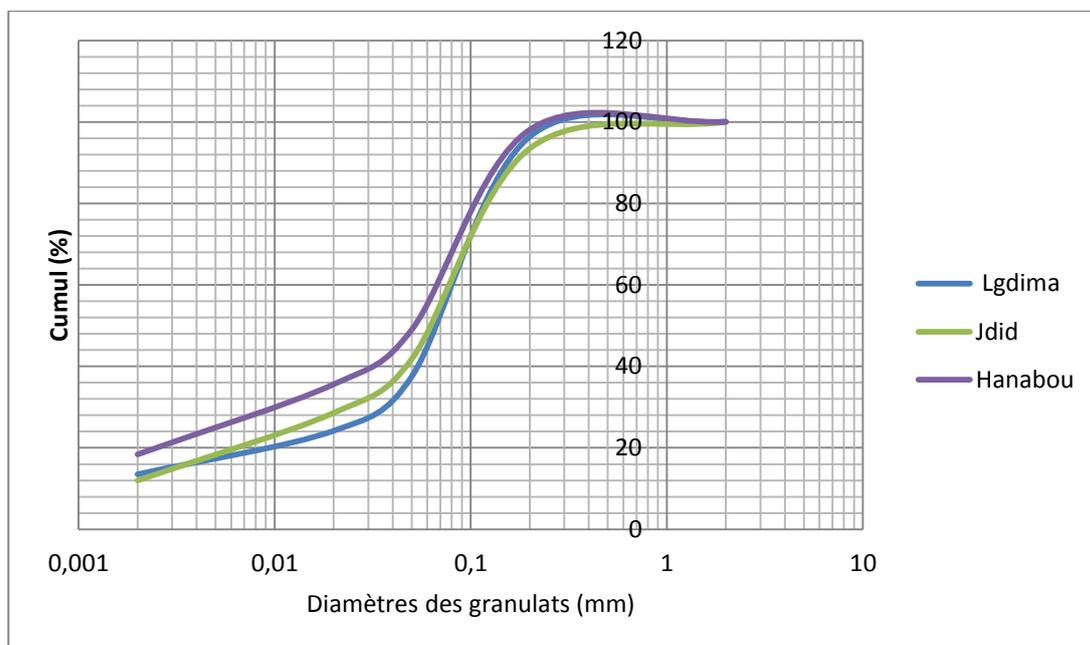


Figure2. 2: Courbe granulométrique des échantillons des séguias du périmètre Jorf-Arfoud (H. Ennabbagui, 2015)

- ✓ D'après l'analyse granulométrique de l'échantillon correspondant au sol de la séguia Hanabou, on remarque que le sable fin représente la plus grande proportion 47.5%. Pour les autres proportions, elles varient entre 2% et 24.3 %.



figure2. 4:Argile utilisée de la carrière d'Oulja de Salé

3. Mesure de l'infiltration

➤ Mode opératoire:

La préparation des échantillons consiste à :

- Enlever les saletés et les débris dans l'échantillon,
- Broyer les éléments grossiers,
- Tamiser les échantillons à l'aide d'un tamis de 2mm
- Sécher à l'étuve pour une durée de 24heures environ qui aura pour but d'enlever toute l'humidité.
- Peser la quantité de sol que chaque éprouvette aura besoin pour une meilleure répartition de l'échantillon dans les différentes expériences.
- Introduire dans l'éprouvette l'échantillon par colonnes de 10 cm. L'échantillon du sol d'origine peut être mélangé avec différentes proportions d'argile ou bien de la paille ou encore avec de l'eau.
- Compacter (chaque 10 cm) avec 25 coups d'un poids constant jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne 40 cm.
- Mettre en charge avec une charge de 5 cm puis maintenue constante tout au long de l'expérience.
- Mesurer la propagation du front d'humectation à l'aide d'une graduation de telle sorte la mesure qu'on enregistre la profondeur d'infiltration en fonction du temps.

➤ Matériel utilisé

Appareil de démonstration de l'infiltration : il est composé d'éprouvette graduée de 2000ml perforée pour laisser passer l'eau que contiennent les échantillons, le récipient collecteur et d'un socle muni de pieds réglables. Elle comporte 3 compartiments où on peut déposer les éprouvettes. La base de ce socle où on dépose ces derniers est équipée de plaques perforées pouvant retenir les matériaux tout en laissant s'écouler l'eau. On a aussi l'échantillon lui-même (c'est-à-dire le sol broyé, tamisé et séché) l'eau, l'argile et la paille. Ces derniers seront mélangés à différents pourcentages avec l'échantillon d'origine



Figure2. 5: appareil de démonstration de l'infiltration

III. Compactage :

Le compactage est l'ensemble des mesures, résultant de l'application d'une charge sur les sols, prises pour l'augmentation de la densité apparente sèche (γ_d / γ_w) du sol c'est à dire la réduction de son volume apparent par diminution de l'indice des vides. Il permet la diminution des tassements et la perméabilité de la couche traitée afin de s'opposer à l'écoulement de l'eau. Il contribue à l'amélioration des caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression et au cisaillement. Le compactage est influencé par la teneur en eau du sol, la nature du sol et l'énergie fournie pour le compactage.

Pour les différentes expériences faites, les échantillons sont compactés avec la même énergie dans les éprouvettes par couches de 10 cm avec 25 coups.

Partie 3 : Résultats et discussions.

Chapitre 2 : Etude de l'infiltration sur les échantillons des sols au laboratoire

1. Présentation des résultats

✓ Cas de la Séguia Lgdima :

Après le séchage à l'étuve, il a été procédé d'abord à des essais de mesures de l'infiltration sur l'échantillon de Lgdima seul sans compactage et celles avec Lgdima seul avec compactage. Cela a permis d'établir les courbes d'infiltration de la figure 3.1 :

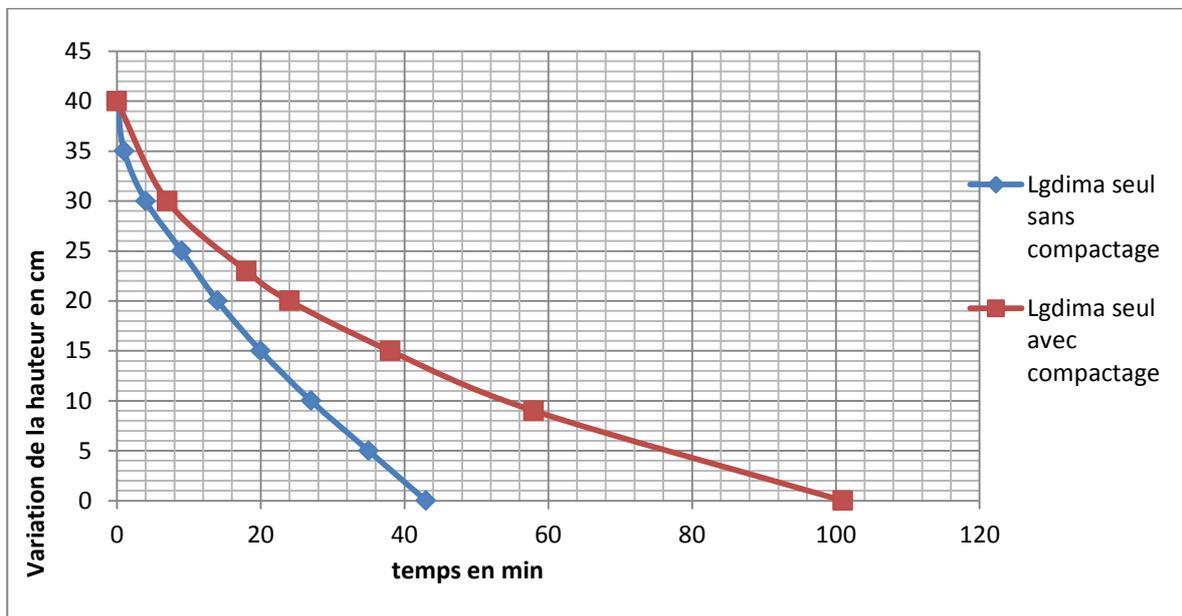


Figure3. 1 : Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima seul à sec

✓ Cas de la Séguia Hanabou :

Pour l'échantillon de la séguia Hanabou, on a aussi mesuré l'infiltration sur l'échantillon de Hanabou seul sans compactage et celle avec Hanabou seul avec compactage. Cela a permis d'établir les courbes de la figure 3.2:

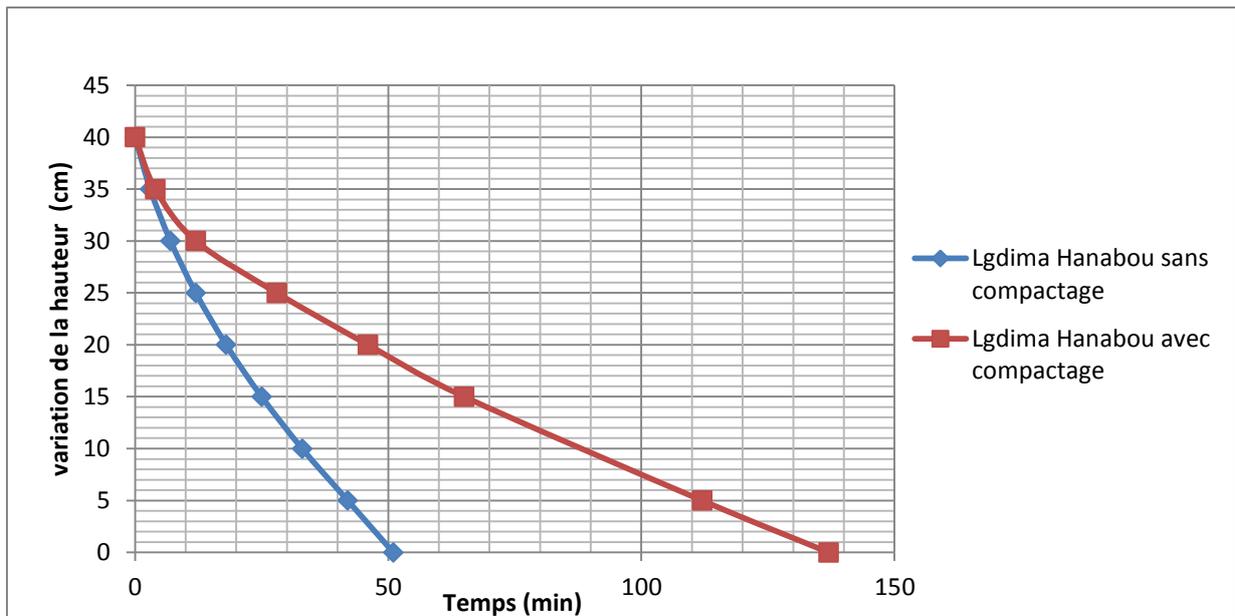


Figure3. 2: Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou seul à sec

✓ **Cas de la Séguia Lhart Jdid :**

Les mesures d'infiltration avec l'échantillon de Lhart Jdid seul sans compactage et celles avec Lhart Jdid seul avec compactage nous ont permis d'établir les courbes de la figure 3.3 :

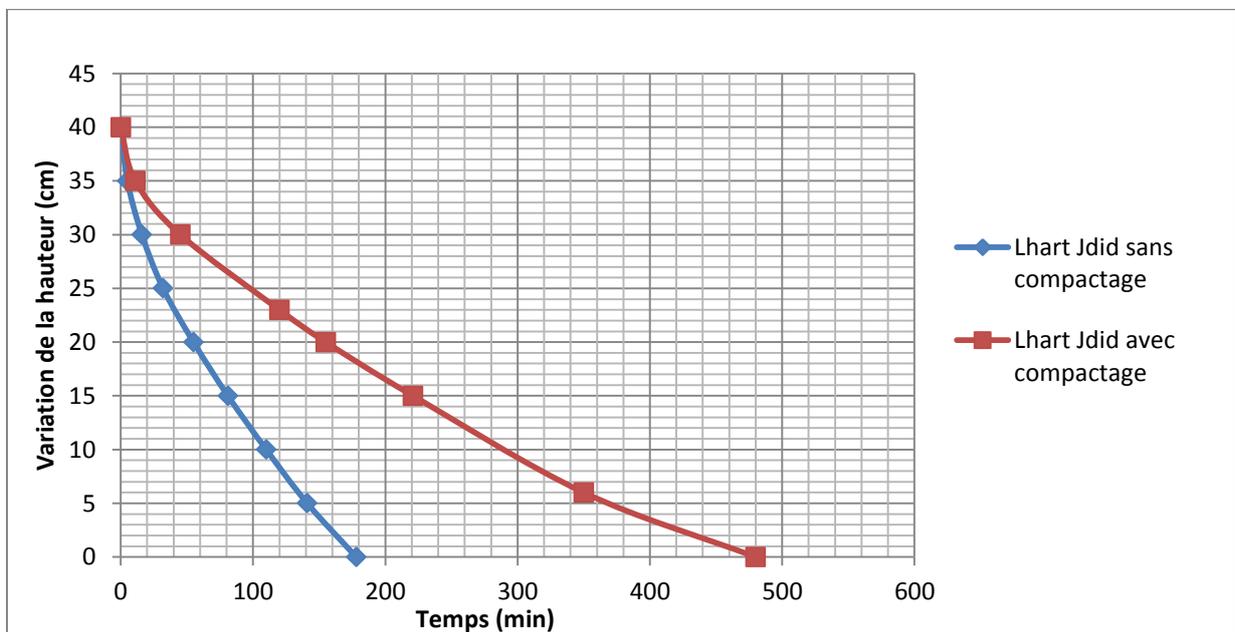


Figure3. 3:Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid seul à sec

2. Discussion

La figure 3.1 représente les différentes mesures d'infiltration de l'échantillon de Lgdima seul à sec. Le temps mis pour que le front d'infiltration traverse les 40cm des éprouvettes est de 43min pour l'échantillon de Lgdima sans compactage et de 101min avec une variation du temps mis de 58 min pour que le front d'infiltration atteigne le niveau 0cm.

La figure 3.2 nous informe sur le comportement de l'infiltration de l'eau dans l'échantillon de Hanabou sec. Le temps mis pour l'infiltration à travers les 40cm est environ 51min et 137min respectivement pour les échantillons sans compactage et avec compactage.

La figure 3.3, quant à elle, représente aussi l'infiltration de l'eau sur des échantillons secs de Lhart Jdid. Le temps mis pour l'infiltration à travers les 40cm est entre 178min pour l'échantillon sans compactage et 480min avec compactage soit 8heures.

On remarque que l'allure de ces deux courbes est la même. La comparaison de ces courbes montre que le temps mis par l'eau pour traverser la colonne de 40cm de l'éprouvette varie d'un échantillon à un autre varie en fonction du temps. Ceci peut être expliqué par le compactage qui a une très grande influence sur l'infiltration et le pourcentage d'éléments fins qui diffère pour chaque échantillon. Le temps augmente considérablement avec l'échantillon de Lhart Jdid qui a 51,7% d'éléments fins.

La vitesse d'infiltration de ces échantillons (voir figure 3.4) présente deux pentes qui donnent deux vitesses pour chaque courbe. La vitesse est grande au début c'est-à-dire dans les 10 aux 20 premiers cm et devient de plus en plus petite quand le front avance (voir Tableau 3.1). Cela peut être expliqué par la profondeur et le fait que la partie inférieure soit plus compactée. Le compactage contribue à une réduction de la porosité du sol. On note aussi que l'écart est dû à la différence de pourcentage d'éléments fins dans les trois échantillons.

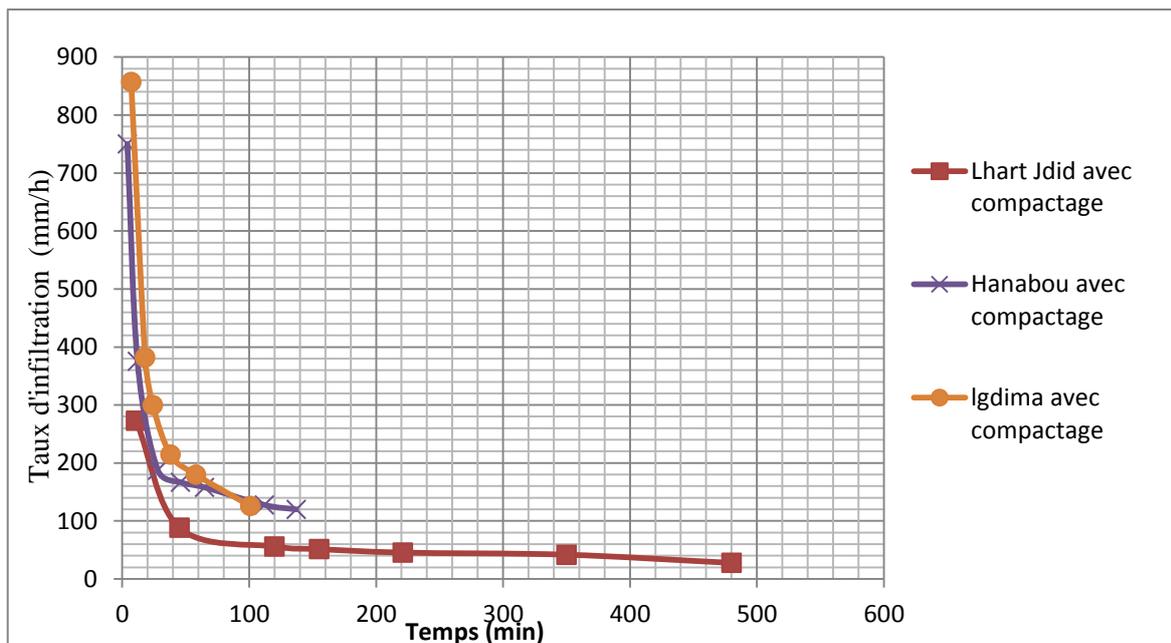


Figure3. 4: Comparaison des taux d'infiltration dans les échantillons des trois séguis.

Tableau 3. 1 : Variation du taux d'infiltration

Echantillon	Vitesse 1 ^{ère} pente (cm/h)	Vitesse 2 ^{ème} pente (cm/h)
Lgdima	50,00	15,58
Hanabou	32,14	13,76
Lhart Jdid	13,33	4,28

Conclusion

Les mesures enregistrées sur les séguis in situ ou avec les essais au laboratoire révèlent une forte infiltration. L'analyse granulométrique nous a permis de déduire que les échantillons ont un pourcentage d'éléments fins qui diffère. Les pertes d'eau sont généralement influencées par la texture du sol et sa consistance.

Chapitre 3 : Etude expérimentale de la réduction de l'infiltration dans les échantillons testés

I. Réduction de l'infiltration par l'ajout d'argile à différents taux d'humidité

1. Essai à l'état sec

a. Présentation des résultats

✓ Cas de la séguia Lgdima

Le suivi du front d'humectation de l'échantillon de la séguia Lgdima sec et mélangé avec 5%, 10%, 15%, 20% et 25% d'argile a permis de tracer les courbes de l'infiltration et le taux d'infiltration en fonction du temps sur les figures 3.5 et 3.6

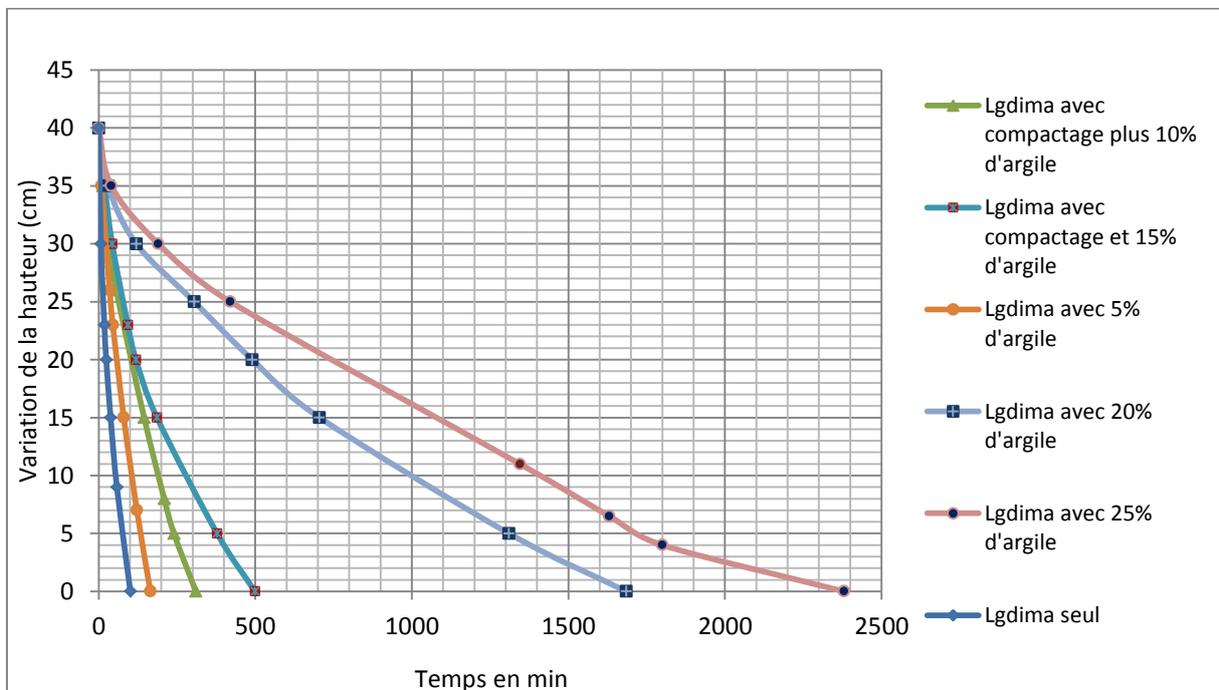


Figure3. 5: Analyse de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec

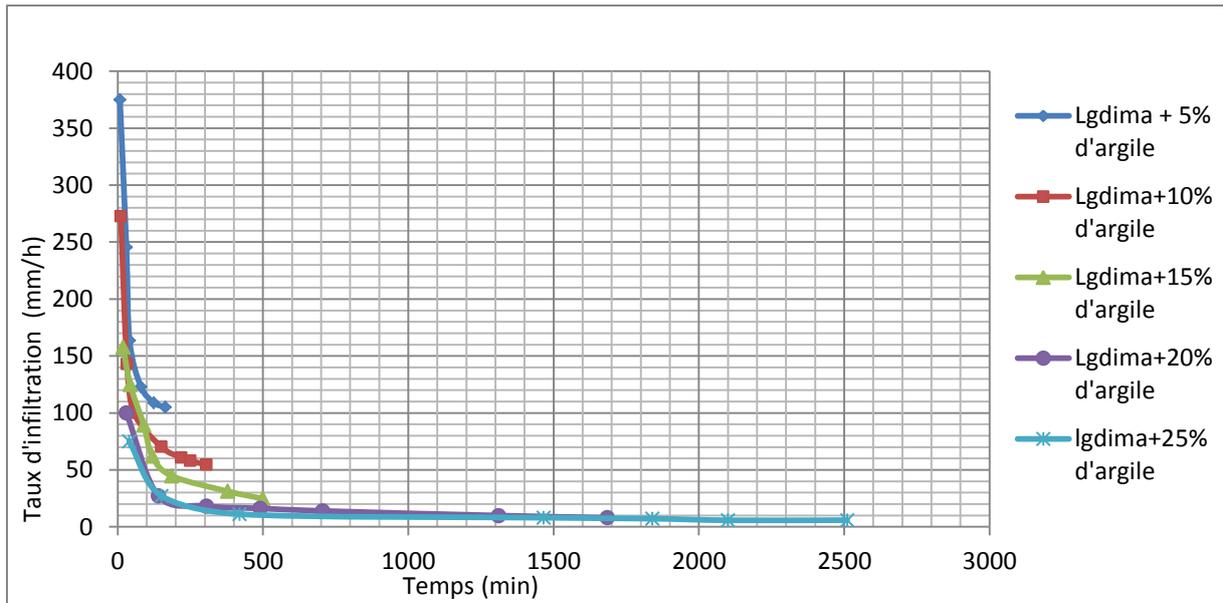


Figure3. 6: Mesure du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec

✓ **Cas de la séguia Hanabou**

Pour celui de l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé avec 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25% d'argile, les courbes de l'infiltration et le taux d'infiltration tracés sont présentés sur les figures 3.7 et 3.8.

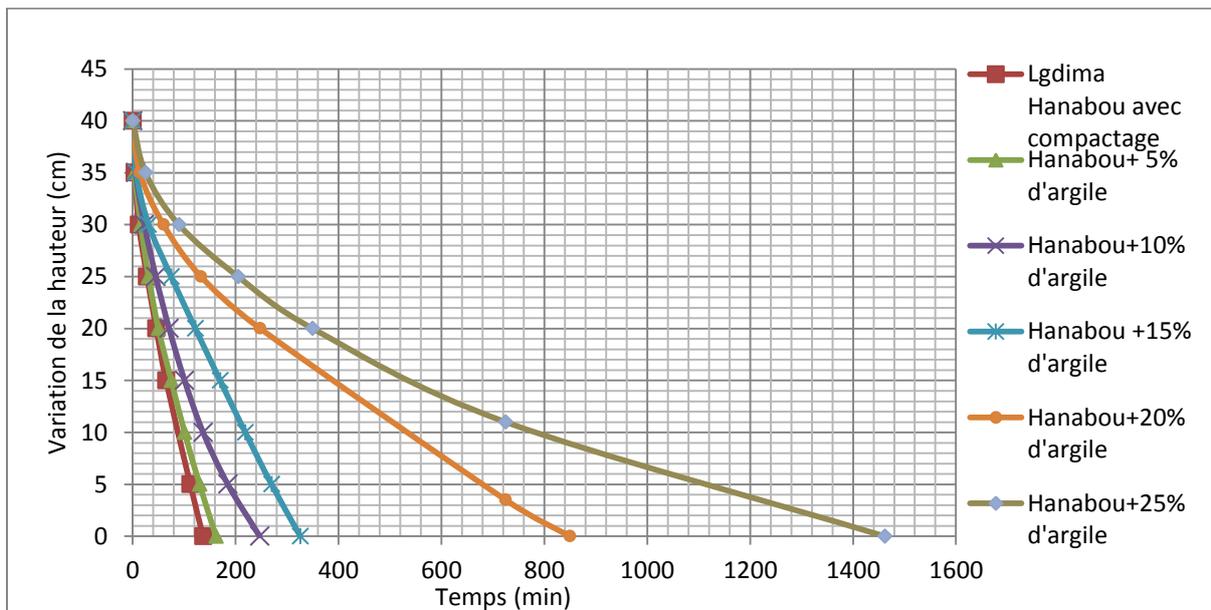


Figure3. 7: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou

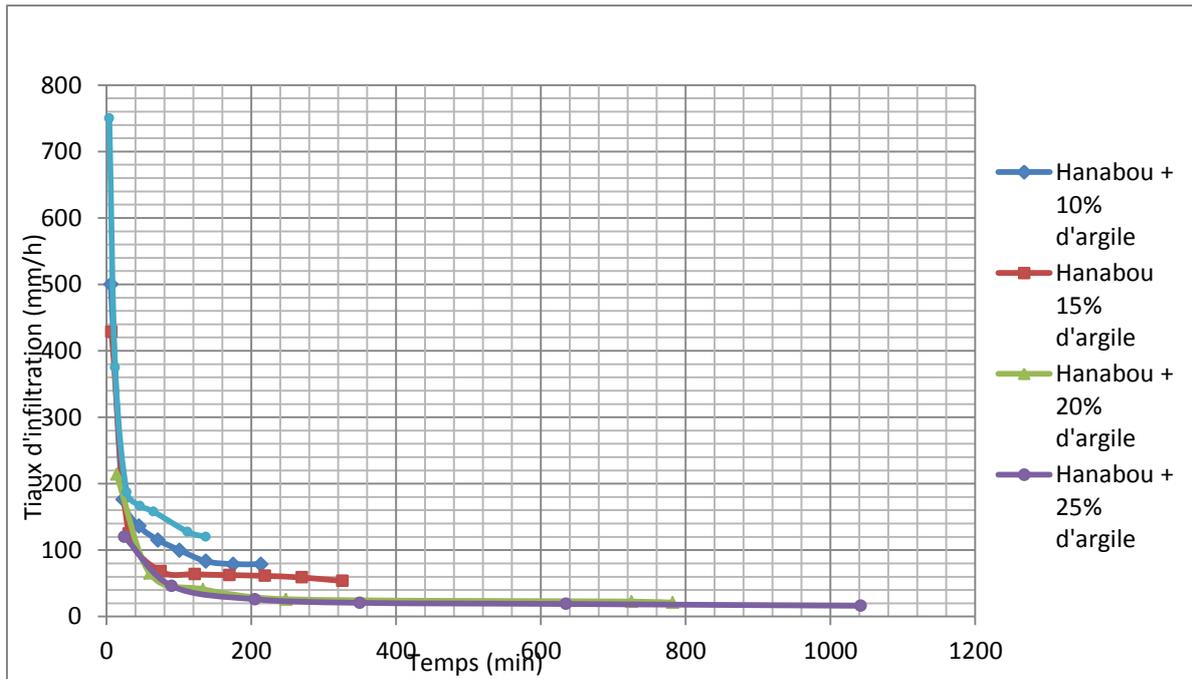


Figure3. 8: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou

✓ **Cas de la séguia Lhart Jdid**

Le suivi du front d'humectation de l'échantillon de la séguia Lhart Jdid avec différents pourcentages d'argile qui sont 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25% a permis de tracer les courbes sur la figure 3. 9 et la figure 3.10.

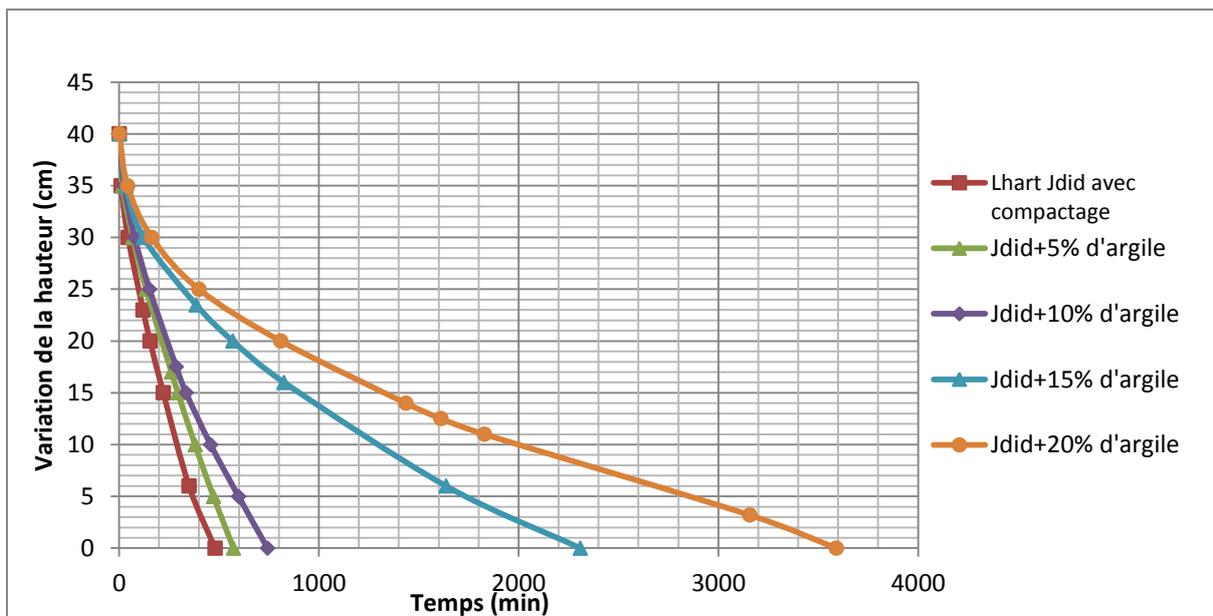


Figure3. 9: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid

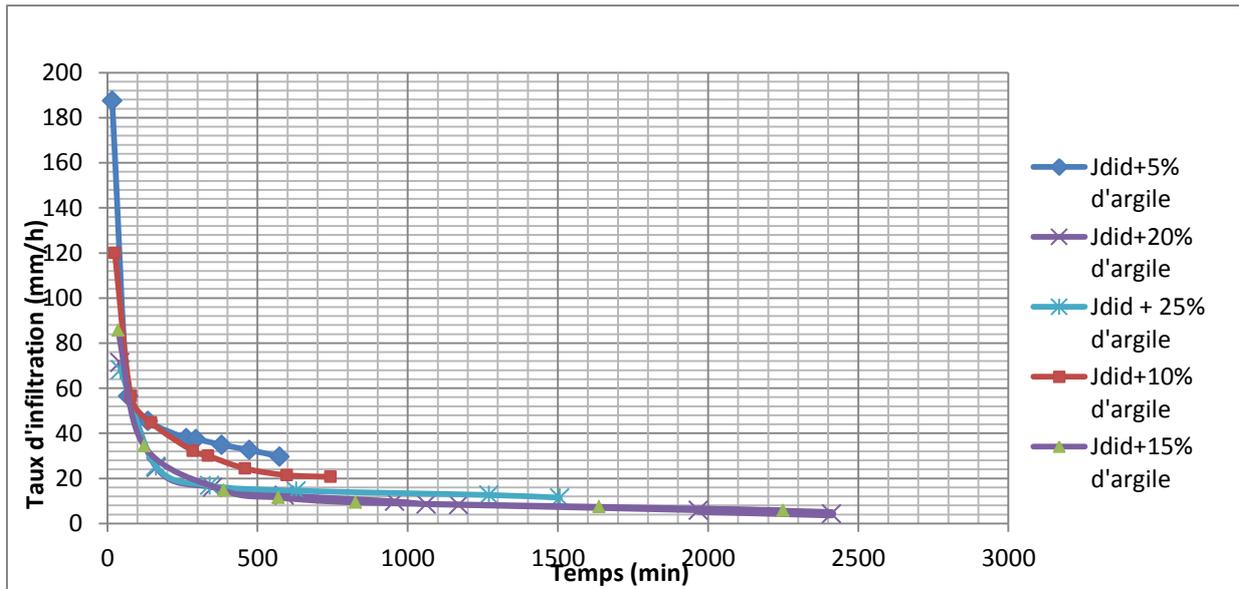


Figure3. 10: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid

b. Discussion :

La figure 3.5 représente la mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec seul et après, mélangé avec différentes proportions d'argile 5%, 10%, 15%, 20% et 25%. On remarque que le temps d'infiltration varie en fonction du pourcentage d'argile ajouté. Ce temps augmente de plus en plus quand on augmente la portion d'argile. Ce temps est compris entre 165min pour l'ajout de 5% d'argile, 310min pour 10% d'argile, 499min pour 15% d'argile, 1685min pour 20% d'argile et 2380 min pour l'ajout de 25% d'argile. Quant à la courbe du taux d'infiltration (figure 3.6), elle est caractérisée par deux pentes distinctes qui correspondent à deux taux d'infiltration différents(voir Tableau 3.2).

La figure 3.7 représente elle aussi la mesure de l'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou à sec seul et avec 5%, 10%, 15%, 20% et 25% d'argile. L'analyse de ces courbes révèle que le temps d'infiltration augmente progressivement avec le pourcentage d'argile ajouté. Ainsi on a 137min avec l'échantillon seul, 162min pour l'ajout de 5% d'argile, 247min pour 10%, 326min pour 15%, 850 min pour 20% d'argile et 1462 min pour celui de 25% d'argile. Le taux d'infiltration est représenté par la figure 3.8 et est caractérisé également par deux pentes de vitesses différentes.

La figure 3.9 aussi représente la mesure de l'infiltration de l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à sec seul et avec les même pourcentages d' argile que les précédents. On a 465min

avec 0% d'argile, 573min pour l'ajout de 5% d'argile, 743min pour 10%, 2309 min pour 15%, 3591min pour 20% et 1529 min pour celui de 25% d'argile. La courbe du taux d'infiltration (figure 3.10), quant à elle, est caractérisée par deux pentes qui sont équivalentes à des vitesses d'infiltrations qui deviennent de plus en plus faibles quand la quantité d'argile augmente. Le tableau 3.2 représente les différentes vitesses d'infiltration des séguias ainsi que leur diminution par rapport à celle de l'échantillon seul mais compacté.

Tableau 3. 2 : Taux d'infiltration dans les échantillons testés à sec

Echantillon	Ajout de l'argile (%)	Taux 1 ^{ère} pente (cm/h)	Diminution du taux1 (%)	Taux 2 ^{ème} pente (cm/h)	Diminution du taux2(%)
Lgdima	0	50,00		15,58	
	5	23,48	53,04	11,72	24,78
	10	15,00	70,00	6,14	60,59
	15	8,06	83,88	2,88	81,51
	20	5,00	90,00	0,92	94,09
	25	3,16	93,68	0,82	94,74
Hanabou	0	32,14		13,76	
	5	29,03	9,68	11,45	16,79
	10	26,08	18,86	8,03	41,64
	15	12,00	62,66	5,97	56,61
	20	10,94	65,96	1,79	86,99
	25	6,67	79,25	1,70	87,65
Lhart Jdid	0	13		4,28	
	5	8,27	37,96	3,45	19,39
	10	7,69	42,31	2,7	36,92
	15	2,56	80,80	0,73	82,94
	20	2,25	83,12	0,47	89,02

Les taux diminuent quand on augmente le pourcentage d'argile et passent de 50 cm/h à 3,16cm/h pour la première pente de la courbe et 15,58cm/h à 0,82cm/h pour la seconde pente, et ceci pour l'échantillon de Lgdima avec respectivement 0% d'argile et 25% d'argile. Ainsi l'infiltration a diminué de 93,68% pour la première pente et 94,74% pour la seconde par rapport à l'échantillon seul sans argile. Pour Hanabou on a 32,14cm/h et 13,76cm/h pour la première et la seconde pente avec 0% d'argile et 9,04cm/h et 1,04cm/h avec 25% d'argile avec une diminution de 79,25% pour la première pente et 87,65% pour la deuxième pente. La séguia Lhart Jdid quant à elle a les taux les plus faibles parmi les trois séguias. On a enregistré 13 cm/h pour la 1^{ère} pente et 4,28cm/h pour la 2^{ème} pente avec

l'échantillon seul et 2,25cm/h et 0,47cm/h pour l'ajout de 20% d'argile. Ces différences de résultats sont dues au pouvoir de rétention de l'argile qui augmente de plus en plus quand on augmente l'argile. La nature du sol d'origine joue un grand rôle dans les résultats obtenus.

2. Essai à 5% d'humidité.

a. Présentation des résultats :

Les échantillons préparés (c'est-à-dire broyés, tamisés et séchés) sont mélangés avec les différents pourcentages d'argile et ensuite mélangés avec de l'eau. Pour maîtriser la quantité de l'eau on a pesé le poids de l'échantillon et calculé la quantité d'eau qui correspond à 5% du poids de l'échantillon. En suivant le front d'humectations des échantillons soumis à une charge d'eau constante, on a eu les résultats suivants pour chaque échantillon testé.

✓ Cas de la séguia Lgdima

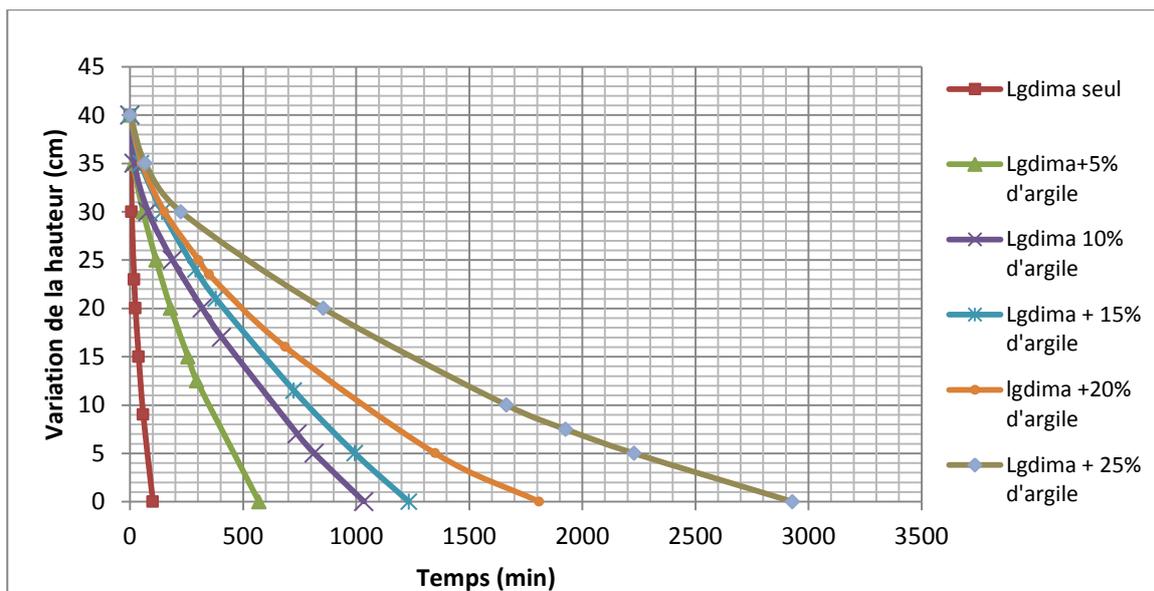


Figure3. 11:Infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima avec 5% de teneur en eau

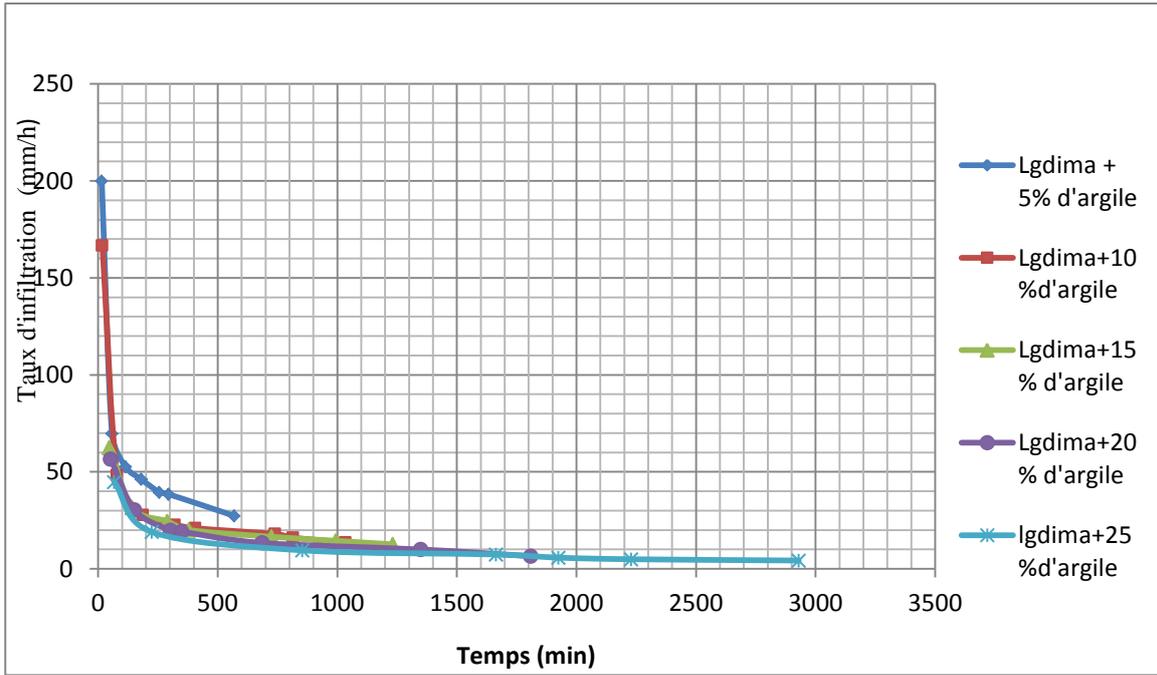


Figure3. 12: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 5% d'humidité

✓ Cas de la séguia Hanabou

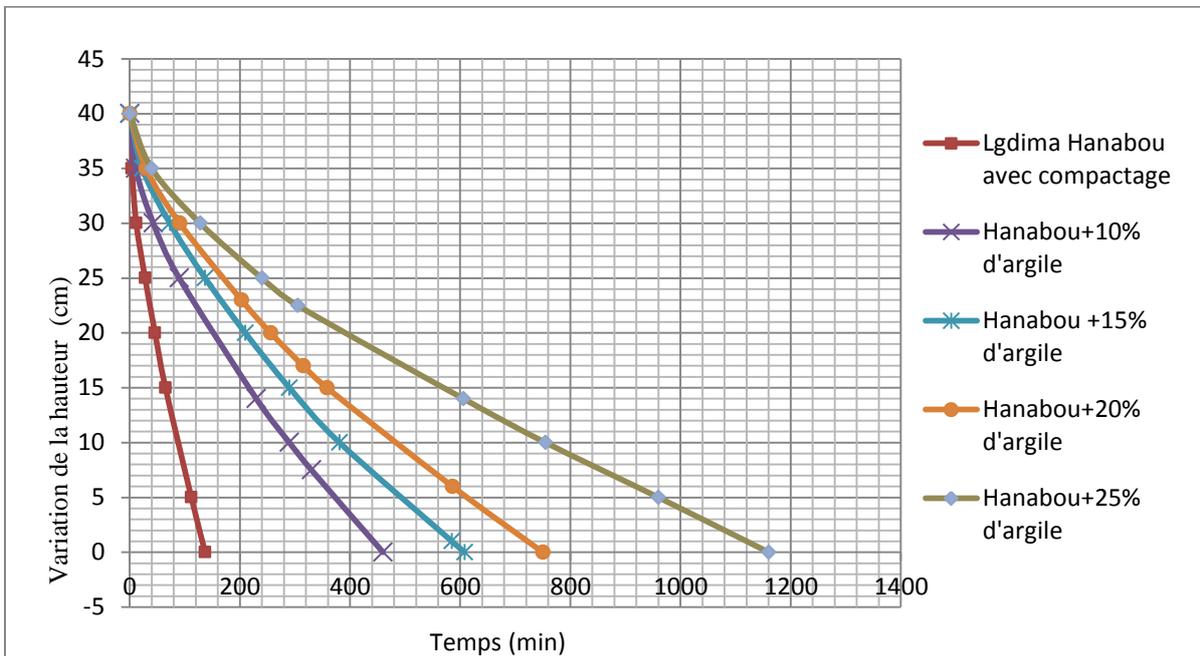


Figure3. 13: Infiltration dans l'échantillon de la séguia de Hanabou avec 5% de teneur en eau

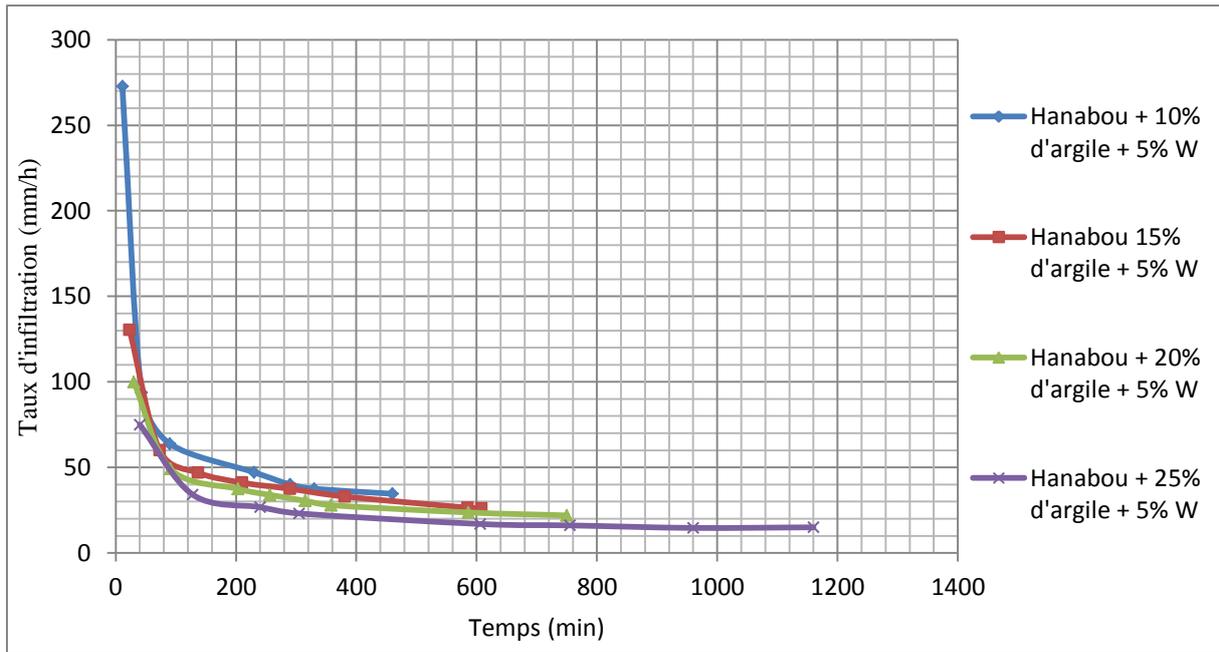


Figure3. 14: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou 5% d'humidité

✓ Cas de la séguia Lhart Jdid

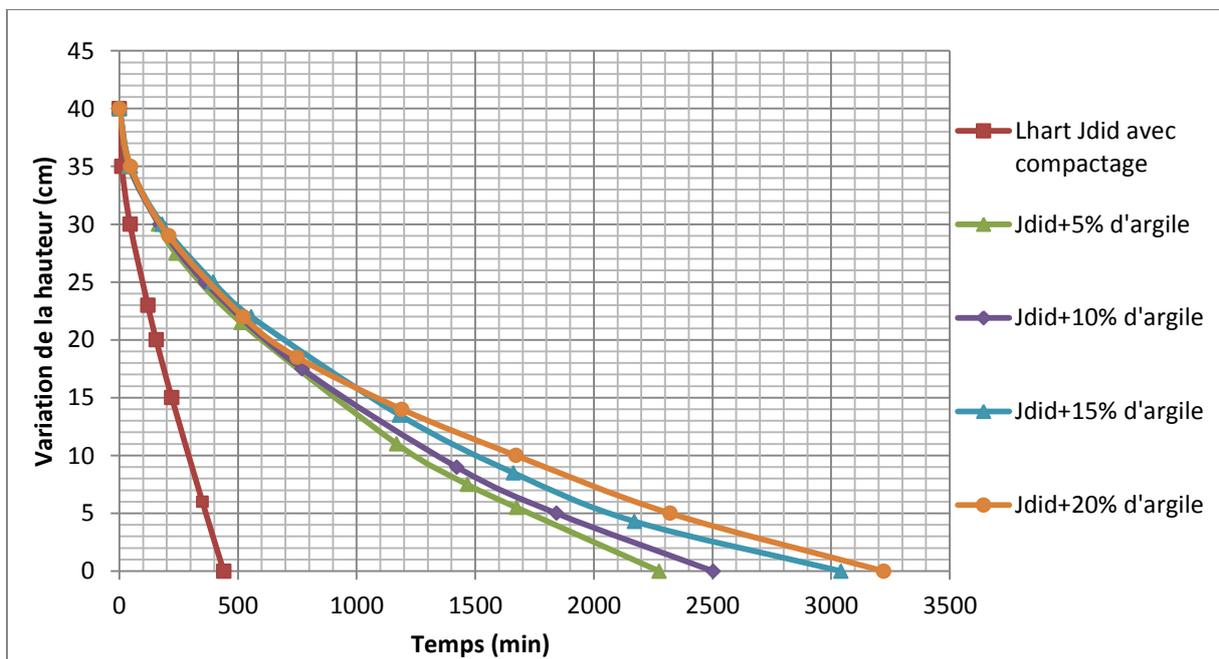


Figure3. 15: Infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid avec 5% de teneur en eau

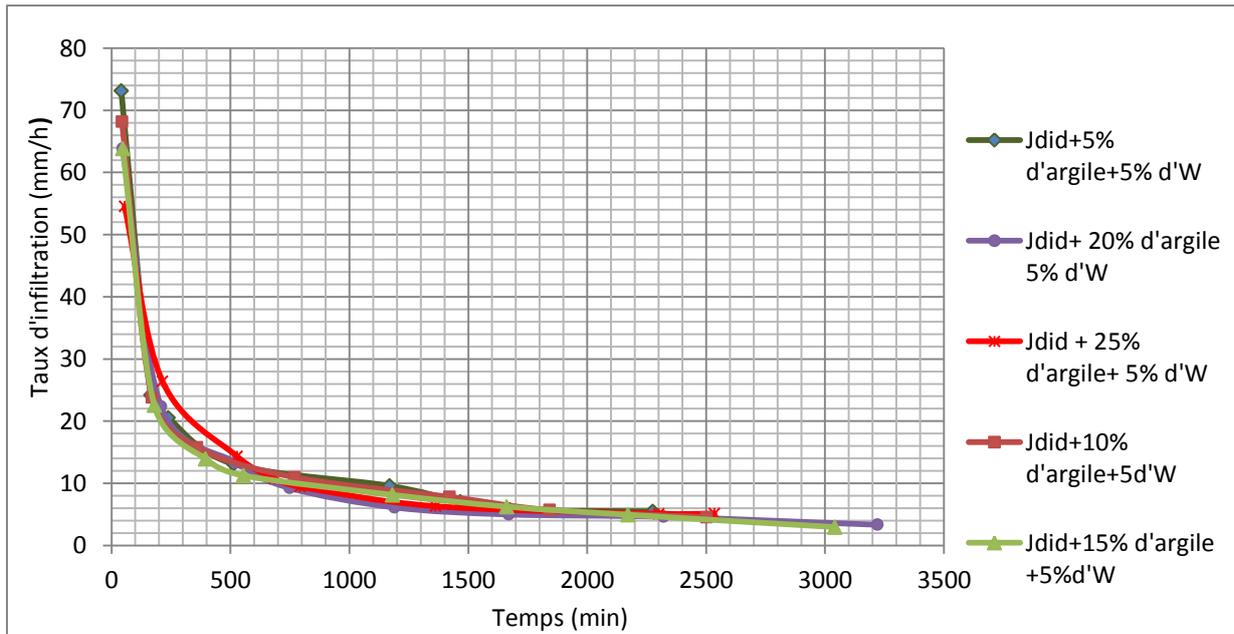


Figure3. 16: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 5% d'humidité

b. Discussion

La figure 3.11 représente la variation de l'infiltration de l'échantillon de la séguia Lgdima avec 5% de teneur en eau et avec 5%, 10%, 15%, 20% et 25% d'argile. On remarque que le temps d'infiltration augmente de plus en plus qu'on augmente la portion d'argile et d'humidité. Il est aux environs de 570min pour l'ajout de 5% d'argile, 1035min pour 10% d'argile, 1233min pour 15% d'argile, 1810min pour 20% d'argile et 2930 min pour l'ajout de 25% d'argile

Pour la figure 3.13 la séguia Hanabou avec 5% d'humidité a permis d'enregistrer les temps d'infiltration suivants : 460min pour 10% d'argile, 608min pour 15%, 750 min pour 20% d'argile et 1160 min pour celle de 25% d'argile.

Pour l'échantillon de la séguia Lhart Jdid avec 5% de teneur en eau, les résultats (figure 3.15) sont : 2275min pour l'ajout de 5% d'argile, 2502min pour 10% d'argile, 3041 min pour 15%, 3690min pour 20% d'argile.

Le fait d'augmenter la teneur en eau de l'échantillon on a enregistré une nette augmentation du temps d'infiltration. Cela aura pour conséquence une diminution du taux d'infiltration dans les échantillons testés et ainsi augmenter le pourcentage de la diminution des vitesses de la première et deuxième pente par rapport à celle de l'échantillon seul (voir tableau 3.3).

Tableau 3. 3: Taux d'infiltration dans les échantillons testés à 5% d'humidité.

Séguia	Ajout de l'argile (%)	Vitesse 1ere pente (cm/h)	Diminution de la vitesse1 (%)	Vitesse 2eme pente (cm/h)	Diminution de la vitesse2 (%)
Lgdima	0	50,00		15,58	
	5	11,70	76,60	2,76	82,28
	10	5,57	88,86	1,81	88,38
	15	4,19	91,62	1,65	89,41
	20	2,97	94,06	0,99	93,65
	25	2,66	94,68	0,66	95,76
Hanabou	0	32,14		13,76	
	10	10,00	68,89	4,05	70,57
	15	8,21	74,46	3,36	75,58
	20	6,59	79,50	2,73	80,16
	25	4,68	85,44	1,65	88,01
Lhart	0	13,33		4,28	
	5	3,63	72,77	1,19	72,20
	10	3,53	73,52	0,77	82,01
	15	3,34	74,94	0,63	85,28
	20	3,17	76,22	0,57	86,68

3. Essai à 10% d'humidité.

a. Présentation des résultats :

On a suivi la même procédure appliqué aux échantillons antérieurement testés et ainsi on a mélangé 300ml d'eau qui correspondent à 10% d'eau par rapport au poids pour remplir l'éprouvette. Les résultats enregistrés sont représentés par les figures suivantes :

✓ Cas de la séguia Lgdima

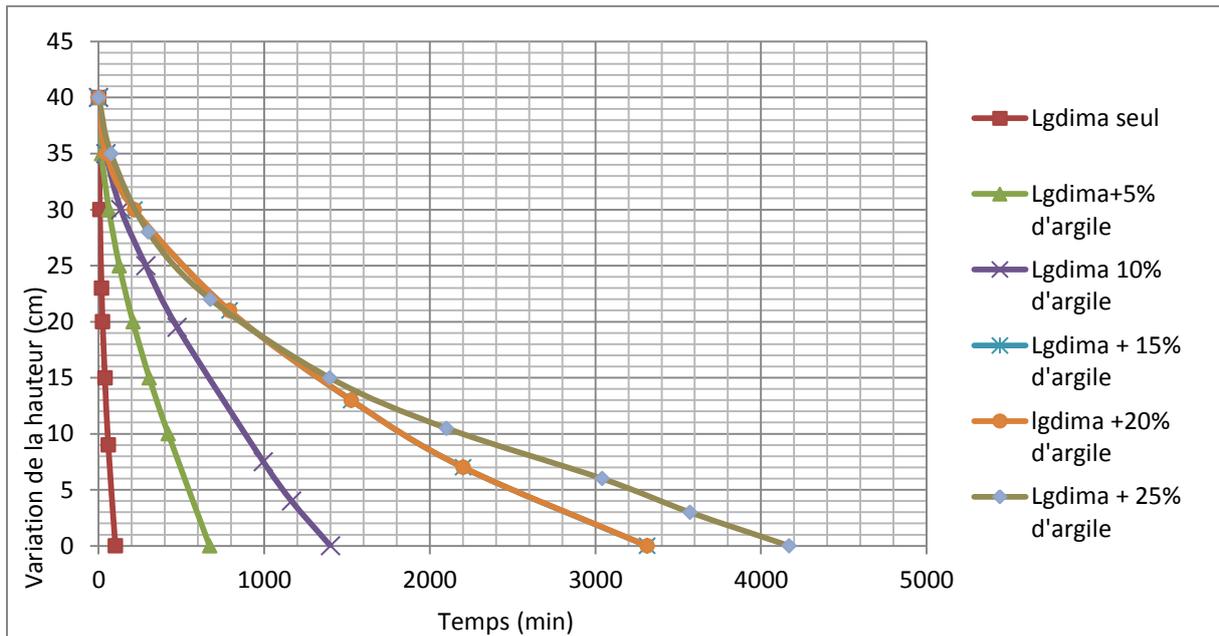


Figure3. 17: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité

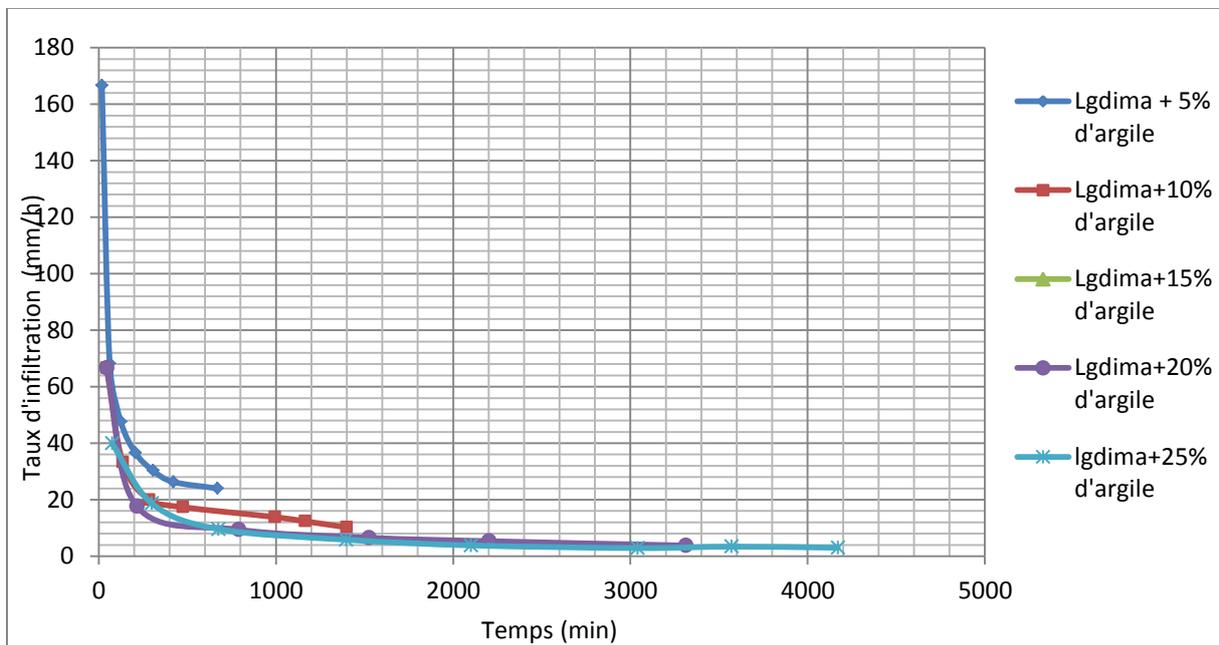


Figure3. 18: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité

✓ Cas de la séguia Hanabou

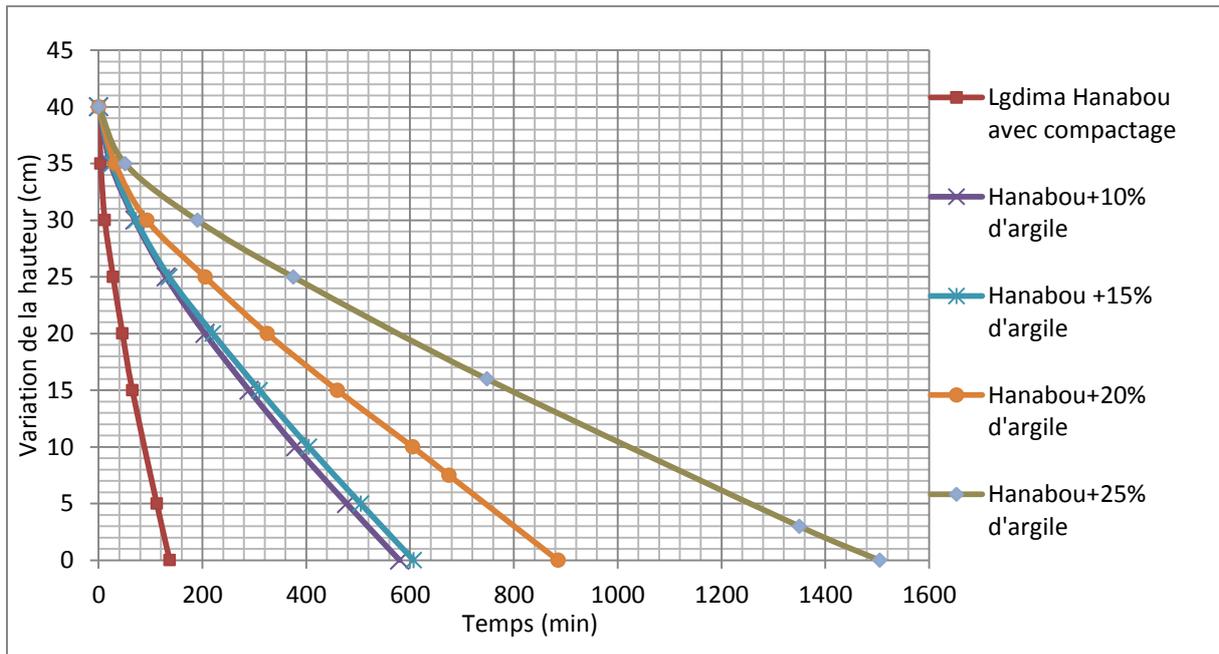


Figure3. 19: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité

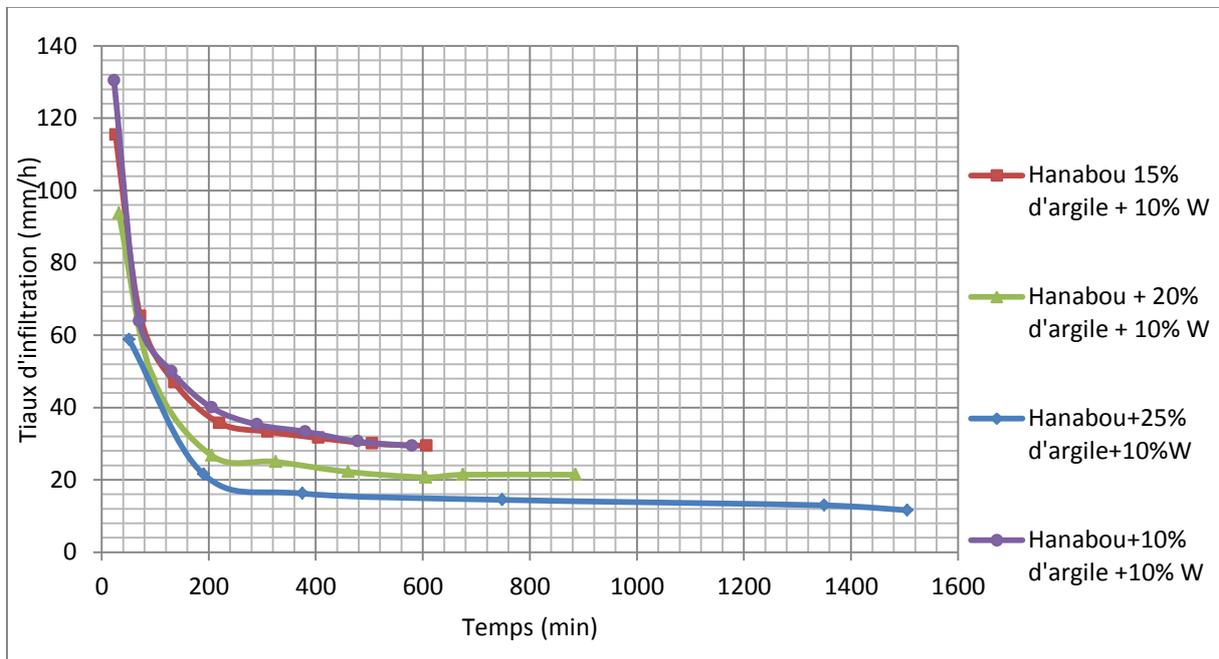


Figure3. 20: le taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité

✓ Cas de la séguia Lhart Jdid

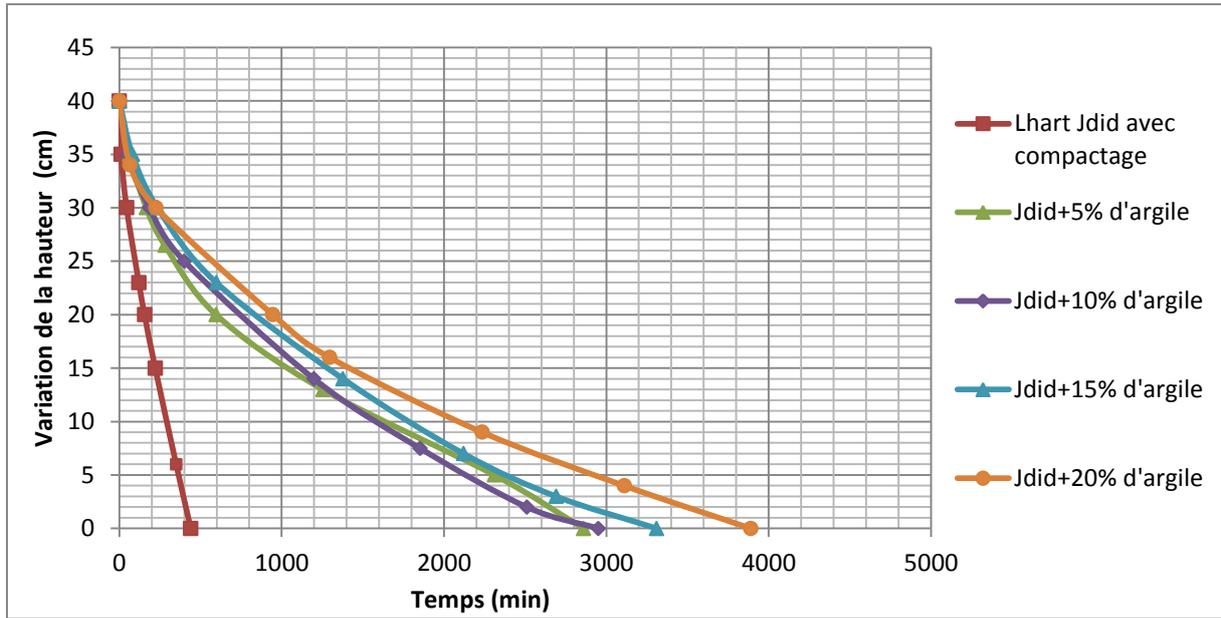


Figure3. 21: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité

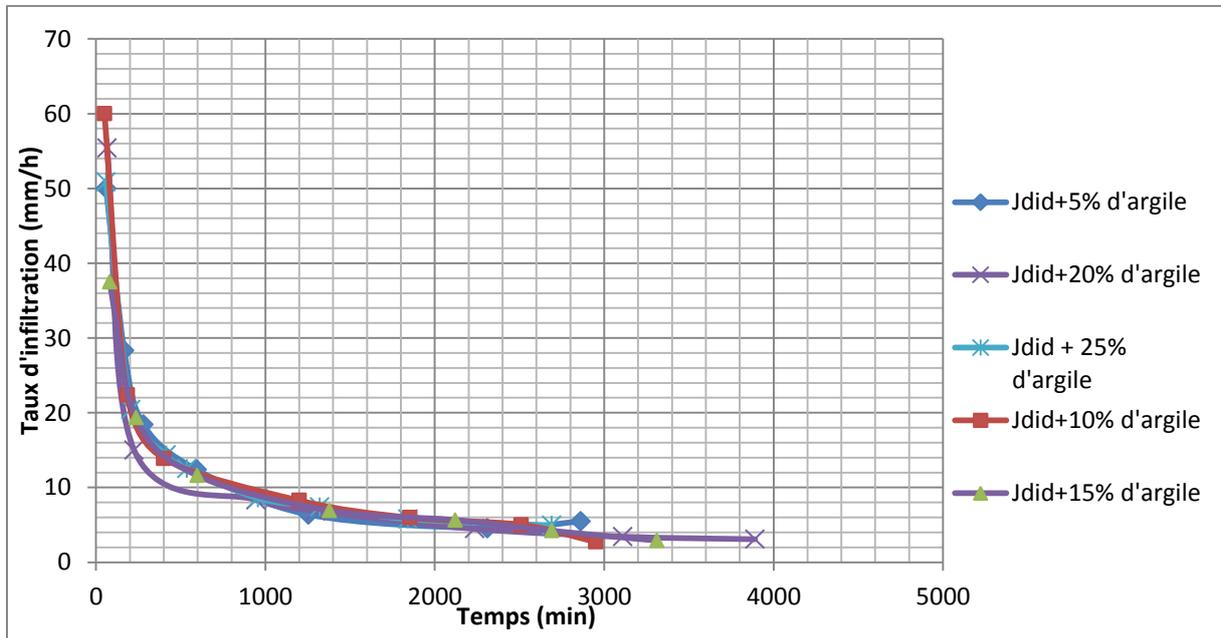


Figure3. 22:Le taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité

b. Discussion :

L'essai sur l'échantillon de la séguia Lgdima avec 10% de teneur en eau a permis d'enregistrer les résultats suivants : 670 min pour l'ajout de 5% d'argile, 1400min pour 10% d'argile, 3313 min pour 15% d'argile, 3470 min pour 20% d'argile et 4170 min pour l'ajout de 25% d'argile (voir figure 3.17).

Pour l'échantillon de la séguia Hanabou avec 10% d'humidité, on a pu enregistrer les temps d'infiltrations suivants : 580min pour 10% d'argile, 609min pour 15%, 885 min pour 20% d'argile et 1505 min pour celle de 25% d'argile (figure 3.19).

Pour l'échantillon de la séguia Lhart Jdid avec 10% de teneur en eau, on a les résultats indiqués dans la figure3.21: 2860min pour l'ajout de 5% d'argile, 2950min pour 10% d'argile, 3310 min pour 15% d'argile, 3890 min pour 20% d'argile.

Le fait d'augmenter encore plus la teneur en eau de l'échantillon de 10% a permis d'enregistrer une nette augmentation du temps d'infiltration. Cela aura pour conséquence une diminution considérable de la vitesse d'infiltration des échantillons et ainsi augmenter le pourcentage de la diminution des vitesses de la première et deuxième pente par rapport à celle de l'échantillon seul (voir tableau 3.4).

Tableau 3. 4: Diminution de la vitesse d'infiltration des échantillons

Echantillon	Ajout de l'argile (%)	Taux 1^{ère} pente (cm/h)	Diminution du taux1 (%)	Taux 2^{ème} pente (cm/h)	Diminution du taux2(%)
Lgdima	0	50,00		15,58	
	5	7,20	85,60	2,75	82,35
	10	3,15	93,70	1,34	91,40
	15	2,79	94,42	0,58	96,28
	20	2,50	95,00	0,55	96,48
	25	1,60	96,80	0,45	97,11
Hanabou	0	32,14		13,76	
	10	6,92	78,47	4,31	68,68
	15	6,61	79,43	3,18	76,89
	20	4,39	86,34	3,19	76,82
	25	3,15	90,20	1,36	90,12
Lhart Jdid	0	13,33		4,28	
	5	2,89	78,32	0,61	85,75
	10	2,25	83,12	0,58	86,45
	15	1,90	85,75	0,54	87,38
	20	1,39	89,57	0,43	89,95

4. Représentation des résultats en fonction du pourcentage d'argile :

✓ Cas de la séguia Lgdima

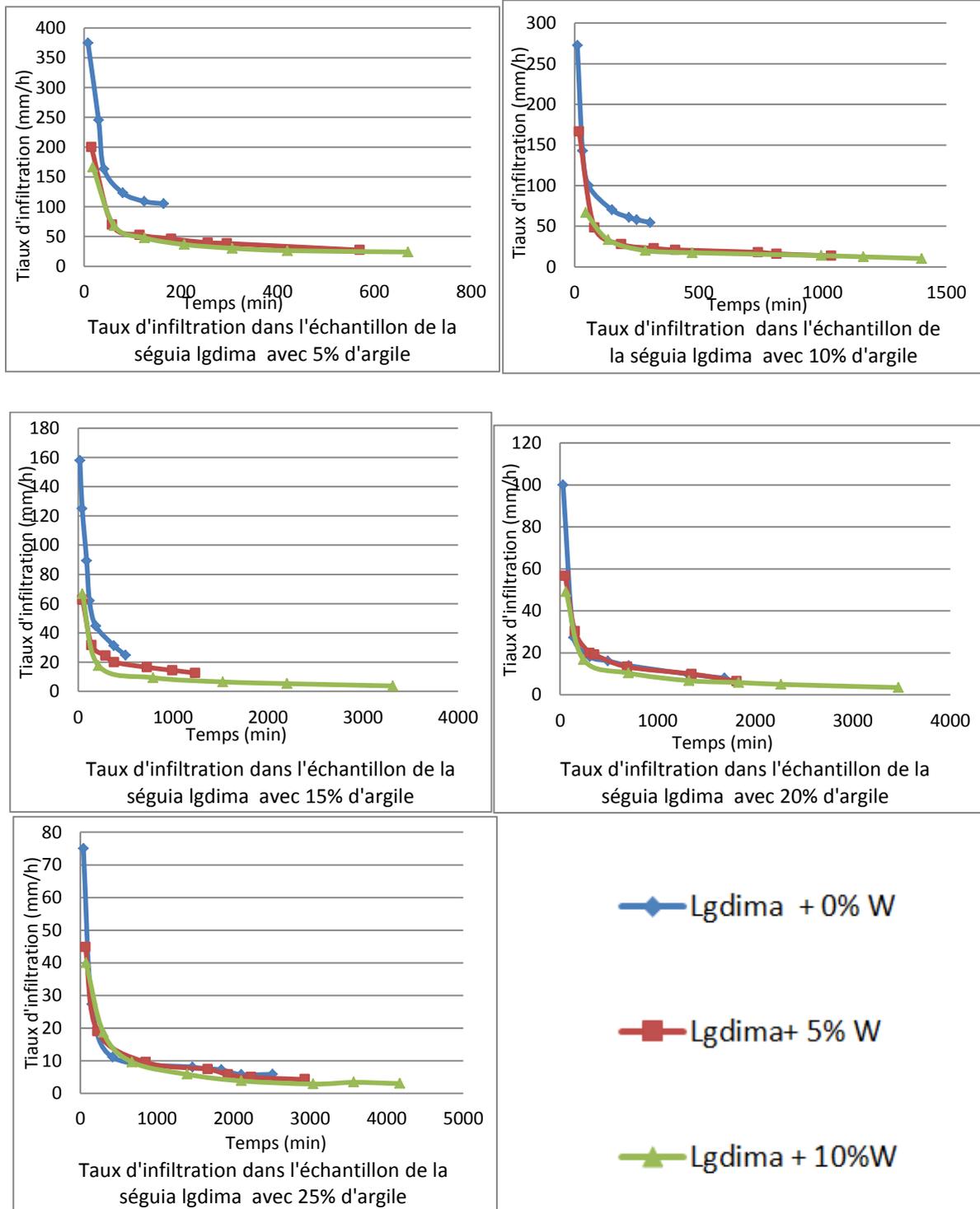


Figure3. 23: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité.

✓ Cas de la séguia Hanabou :

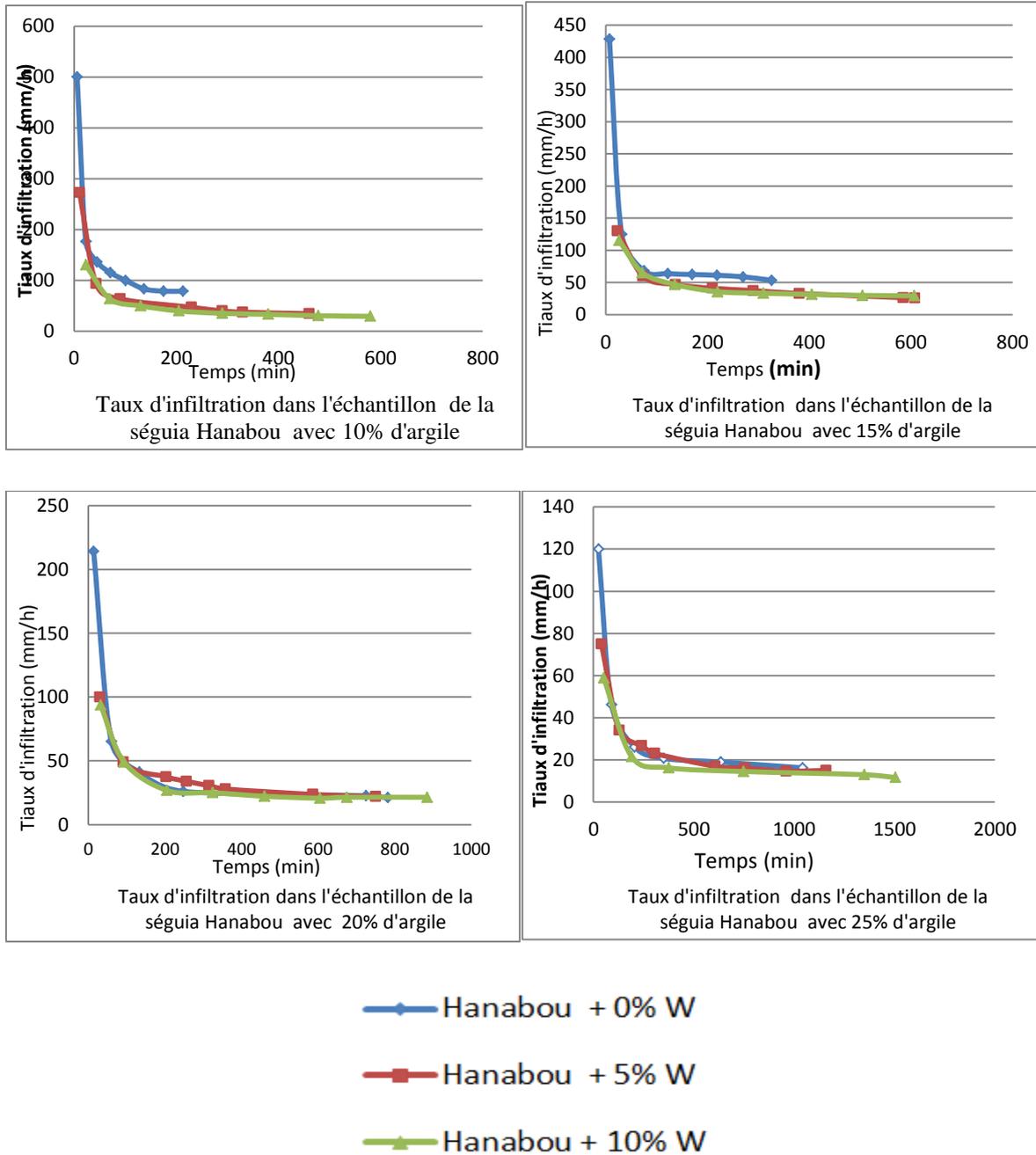


Figure3. 24: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité

✓ Cas de la séguia Lhart Jdid

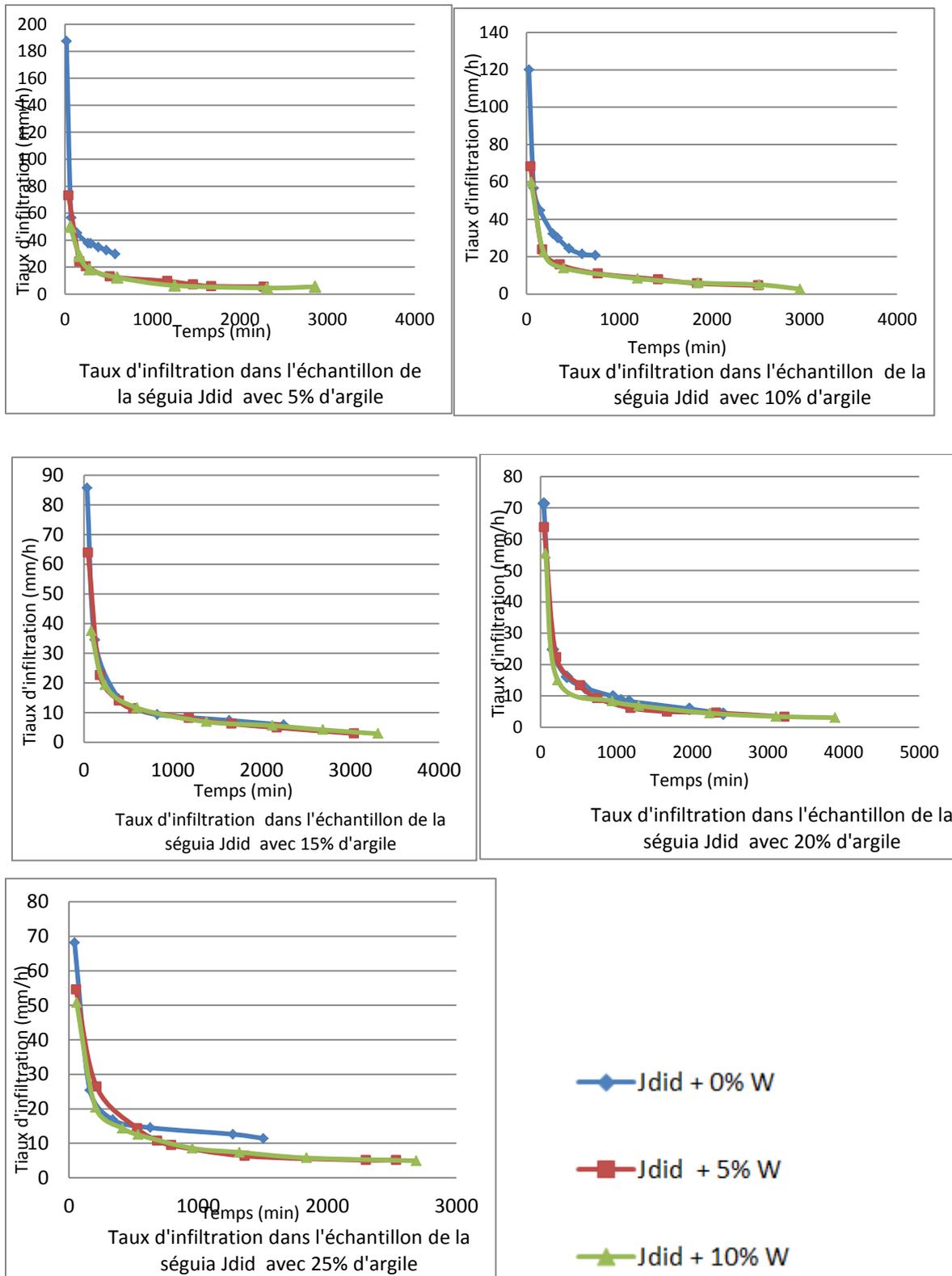


Figure3. 25: Taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid en fonction du pourcentage d'argile et celui de l'humidité.

Les expériences effectuées ont servi à tracer les graphes ci-dessus. Ils représentent le taux d'infiltration en fonction du temps en fixant le pourcentage d'argile ajouté et en variant le taux d'humidité. On peut remarquer que pour les trois séguias considérées, les résultats obtenus sont ceux escomptés. Le taux d'infiltration de l'échantillon avec 10% de teneur en eau est plus faible et diminue de plus en plus si on augmente le pourcentage d'argile. (voir figure 3.23, 3.24, 3.25).

II. Représentation graphique du taux d'infiltration dans un repère logarithmique : Cas de l'échantillon de la séguia Hanabou

1. Présentation des résultats

a. Représentation avec l'essai à l'état sec

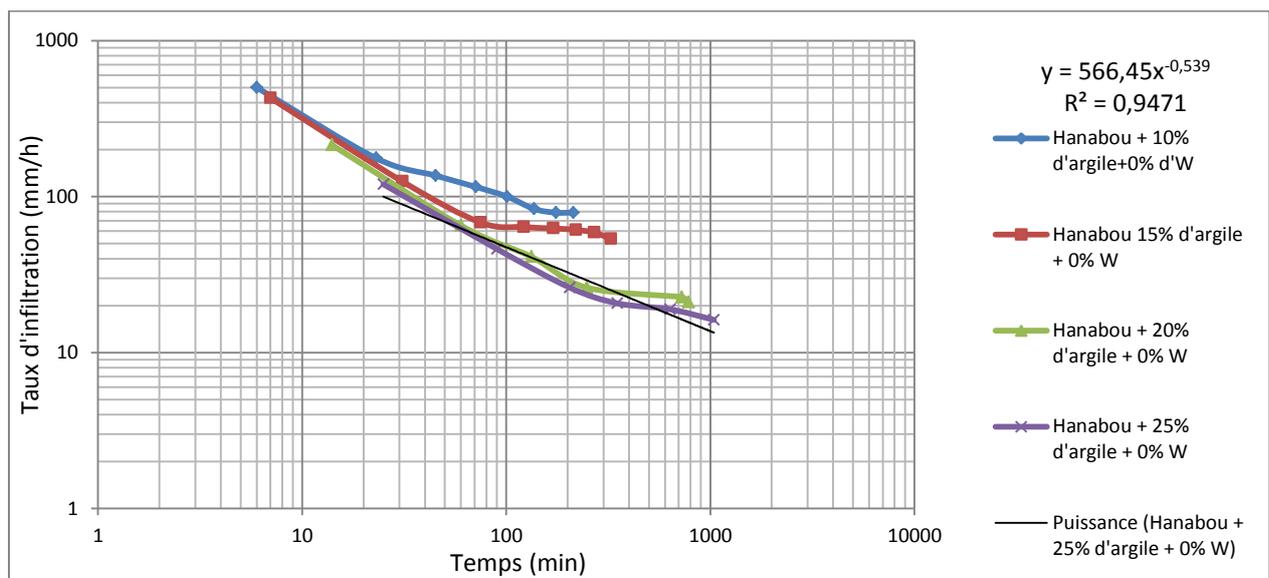


Figure3. 26: Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à sec.

b. Essai à 5% d'humidité

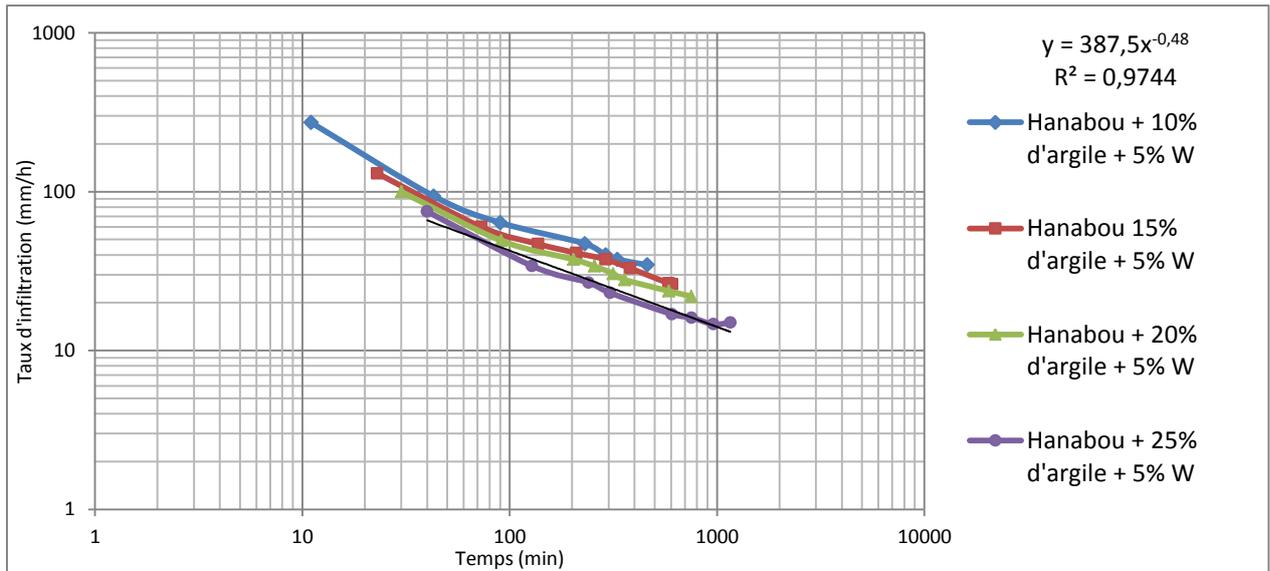


Figure3. 27: Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à 5% d'humidité.

c. Essai à 10% d'humidité

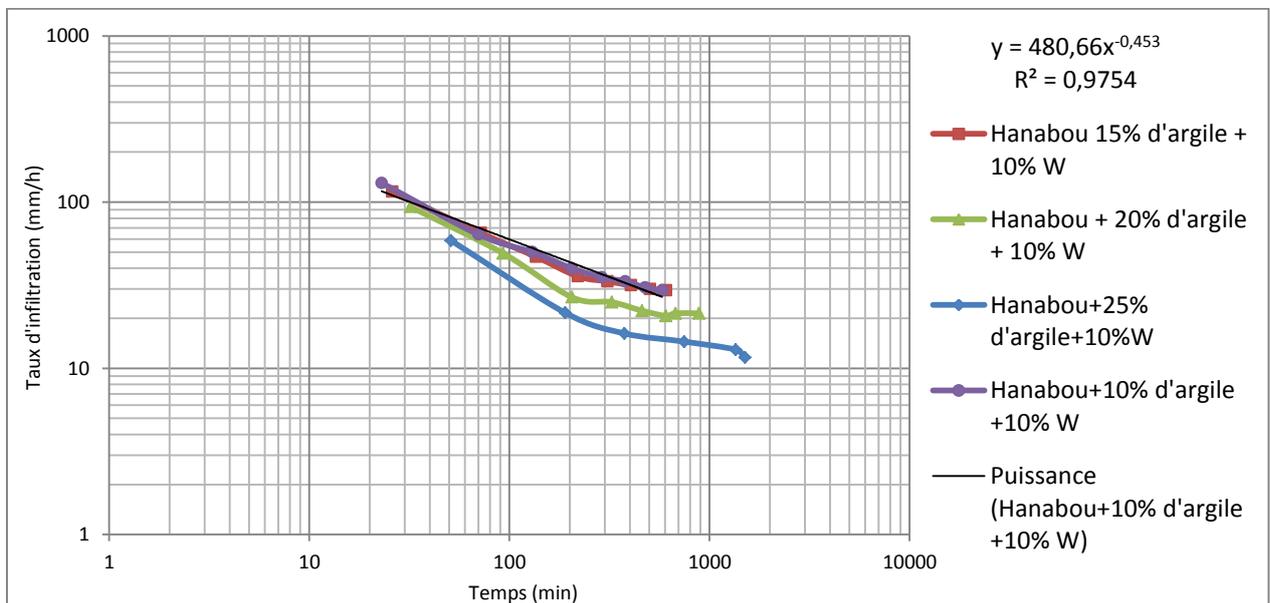


Figure3. 28 : Représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou en fonction du pourcentage d'argile à 10% d'humidité.

2. Discussion :

La représentation logarithmique du taux d'infiltration de l'échantillon de la séguia Hanabou a donné les graphiques ci-dessus. Les courbes de tendances adaptées pour ces derniers sont des courbes de tendances en puissance dont les équations graphiques obtenues sont les suivantes :

L'équation graphique obtenue pour l'essai à sec a donné

$$Y = 566,45 * X^{-0,539}$$

Avec

Y= taux d'infiltration (mm/h)

X=temps (min)

Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,94

Pour l'essai avec 5% d'humidité, l'équation graphique obtenue est

$$Y = 387,5 * X^{-0,48}$$

Avec

Y= taux d'infiltration (mm/h)

X=temps (min)

Son coefficient de détermination R^2 est égal à 0,974

En fin pour l'essai avec 10% d'humidité, l'équation graphique enregistrée est

$$Y = 480,66 * X^{-0,453}$$

Avec

Y= taux d'infiltration (mm/h)

X=temps (min)

Son coefficient de détermination R^2 est égal à 0,975

Les équations obtenues varient en fonction de plusieurs critères à savoir le taux d'argiles utilisées et le pourcentage d'humidité utilisé. Le taux de détermination R^2 des différentes courbes de tendances sont supérieures à 90% ce qui veut dire que les courbes obtenues peuvent être assimilées à des droites.

3. Comparaison des résultats avec le modèle de Kostiakov (1932), Lewis (1937)

Les équations du modèle de Kostiakov et Lewis sont sous forme de :

$$Y=aX^n$$

où a et n sont déterminés graphiquement dans un repère logarithmique.

Les équations des courbes obtenues à partir de la variation du taux d'infiltration en fonction du temps pour l'échantillon testé de la séguia Hanabou, paraissent correspondre aux modèles de Kostiakov et Lewis. Dans notre cas les coefficients sont :

$$387,5 < a < 566,45 \text{ et } -0,453 < n < -0,539$$

III. Réduction de l'infiltration par ajout de la paille et l'argile : Cas de l'échantillon de la séguia Hanabou

1. Présentation des résultats

L'échantillon de la séguia Hanabou avec 10%, 15% et 20% d'argile a été mélangé avec 150g de paille de blé sec. Il a été soumis à différentes teneurs en eau qui ont donné les résultats ci-dessous.

a. Mesure de l'infiltration en fonction de l'humidité

✓ **Essai à l'état sec**

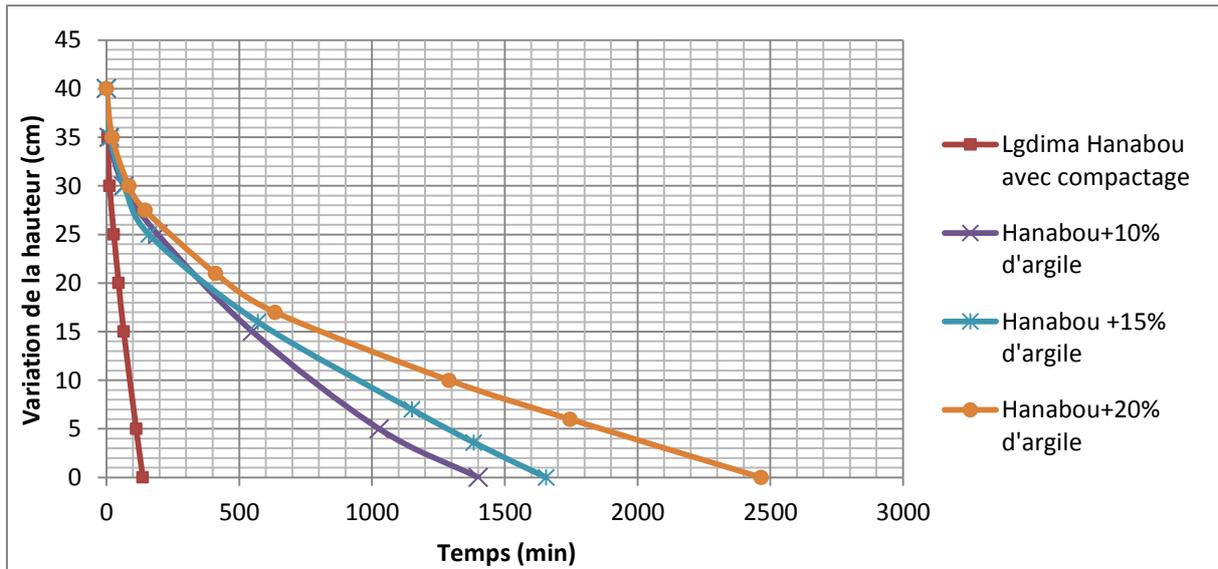


Figure3. 29: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé la paille à sec

✓ Essai à 5% d'humidité

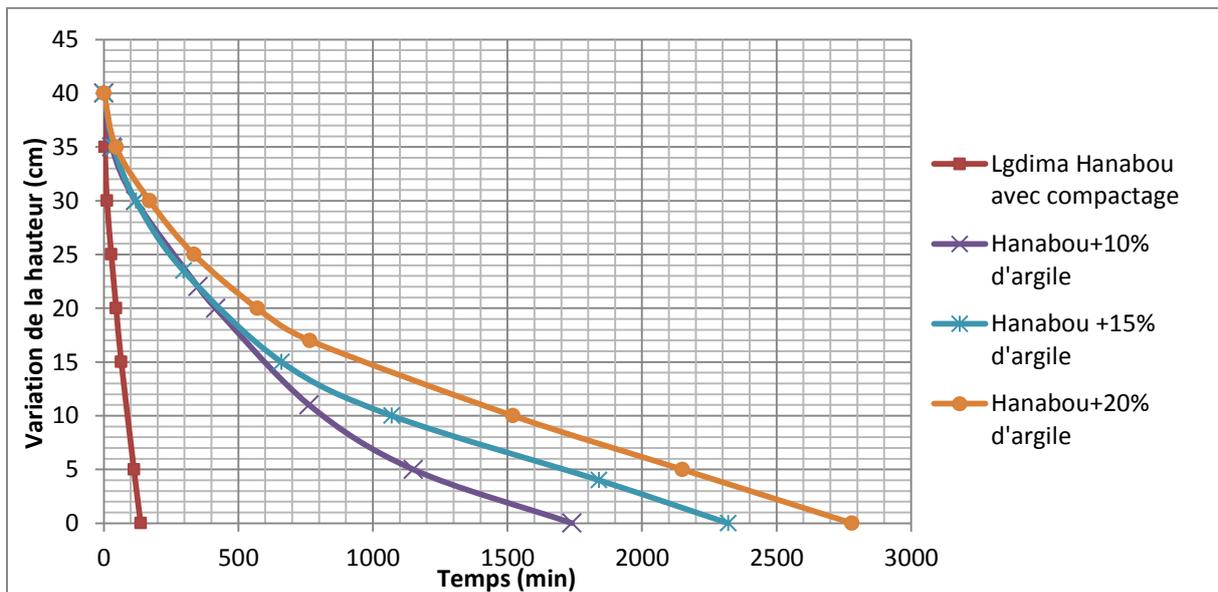


Figure3. 30: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille, à 5% d'humidité

✓ Essai à 10% d'humidité

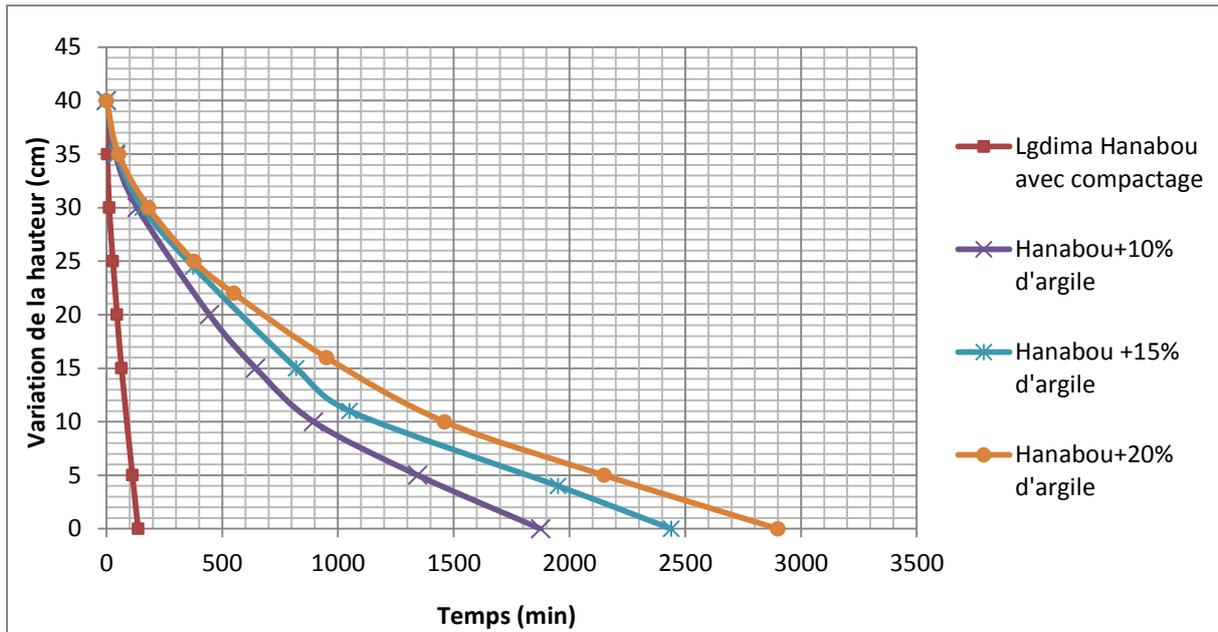


Figure3. 31: Mesure de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille, à 10% d'humidité.

b. En fonction de l'argile

✓ **Mesure du taux d'infiltration avec 10% d'argile**

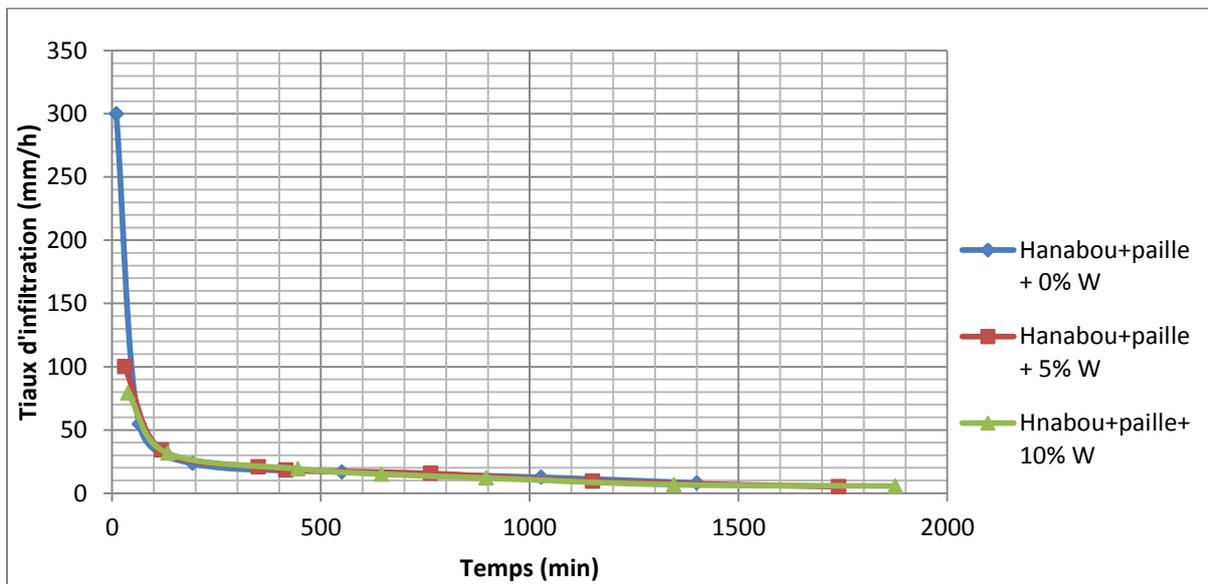


Figure3. 32: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 10% d'argile

✓ **Mesure du taux d'infiltration avec 15% d'argile**

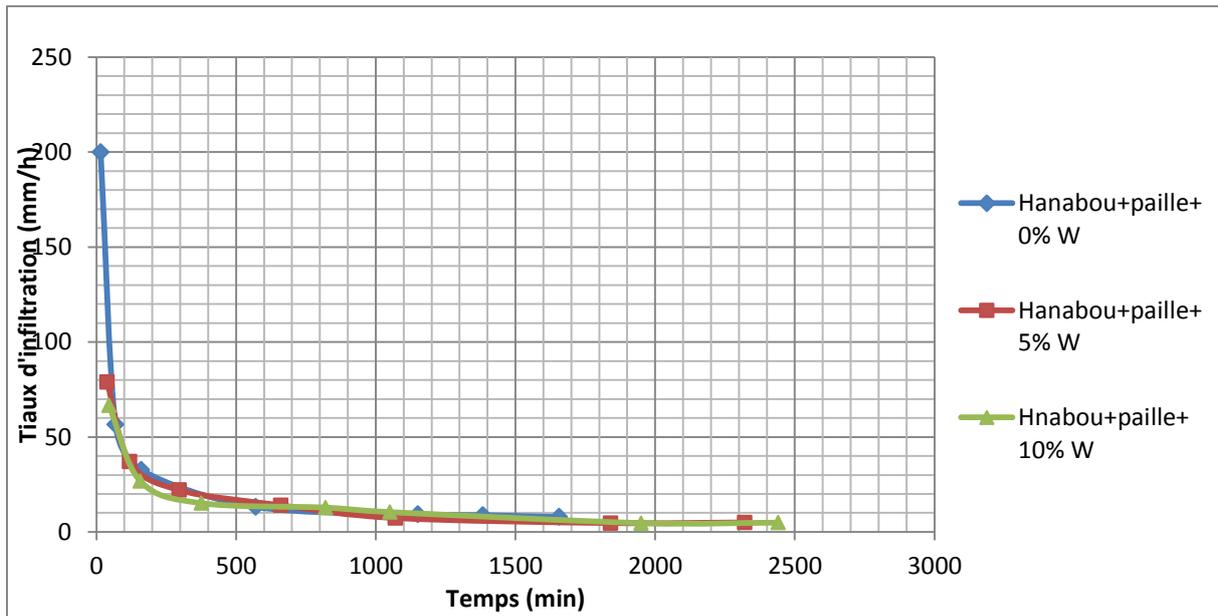


Figure3. 33: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 15% d'argile

✓ **Mesure du taux d'infiltration avec 20% d'argile**

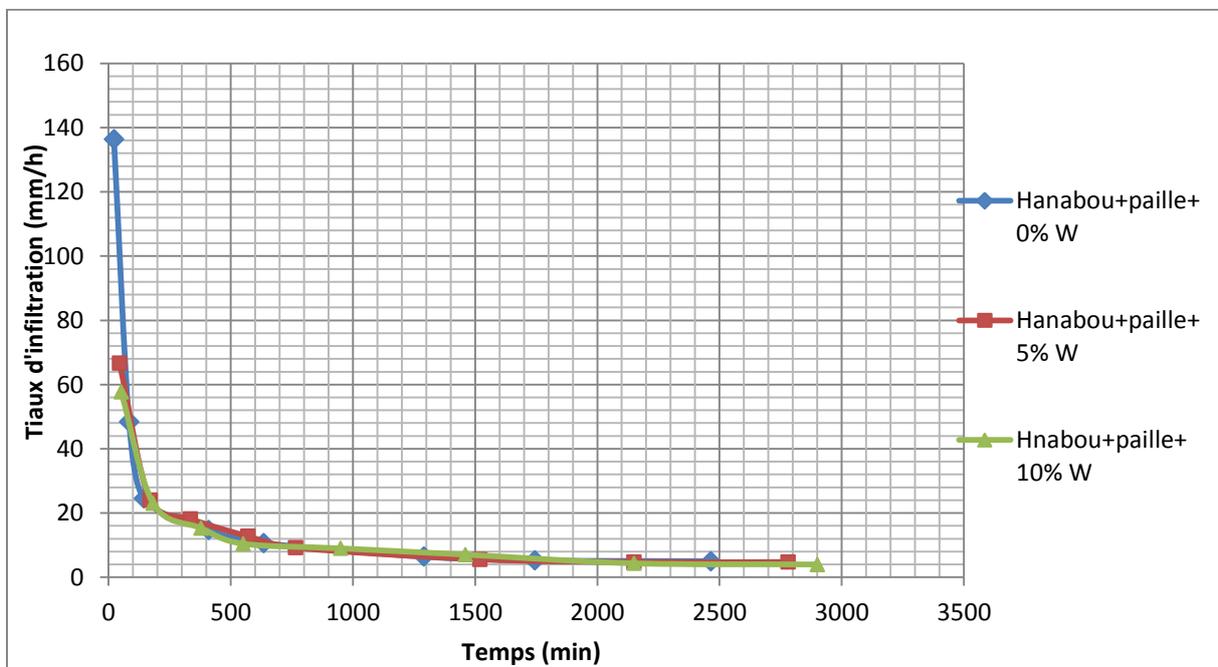


Figure3. 34: Taux de l'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 20% d'argile

2. Discussion

L'expérience sur l'échantillon de la séguia Hanabou (voir figure 26) mélangé avec 150g de paille à sec a permis d'enregistrer les résultats suivants :1400min pour 10% d'argile, 1656min pour 15% d'argile et 2465 min pour 20% d'argile.

La figure 27 représente les mesures de l'infiltration dans l'échantillon de la Séguia Hanabou mélangé à 150g de paille avec 5% d'humidité. Les temps d'infiltration sont les suivants : 1740 min pour 10% d'argile, 2320 min pour 15% d'argile et 2780 min pour 20% d'argile.

Pour l'échantillon de la séguia Hanabou avec 150g de paille et 10% de son poids de teneur en eau, on a les résultats de la figure 3.28: 1875 min pour l'ajout de 10% d'argile, 2440 min pour 15% d'argile et 2900 min pour 20% d'argile.

La paille sèche a un fort pouvoir de rétention d'eau. Mélangée avec de l'argile, on note une augmentation du temps d'infiltration qui devient de plus en plus important avec la variation de la teneur en eau de l'échantillon. Une diminution du taux d'infiltration des échantillons et une augmentation du pourcentage de la réduction des taux correspondant aux première et deuxième pentes par rapport à celle de l'échantillon seul sont notées (voir tableau 3.5).

Tableau 3. 5: Diminution de la vitesse d'infiltration de Hanabou avec de la paille.

Echantillon Hanabou + paille	Ajout de l'argile (%)	Taux 1^{ère} pente (cm/h)	Diminution du taux1 (%)	Taux 2^{ème} pente (cm/h)	Diminution du taux2(%)
0% de teneur en eau	0	32,14		13,76	
	10	5,78	82,02	1,26	90,84
	15	5,62	82,51	1,01	92,66
	20	5,17	83,91	0,71	94,84
5% de teneur en eau	0	32,14		13,76	
	10	4,85	84,91	0,90	93,46
	15	4,61	85,66	0,81	94,11
	20	3,53	89,02	0,69	94,99
10% de teneur en eau	0	32,14		13,76	
	10	3,26	89,86	0,89	93,53
	15	2,91	90,95	0,75	94,55
	20	2,48	92,28	0,61	95,57

IV. Comparaison des résultats obtenus:

En comparant les résultats précédents, on note une augmentation du temps d'infiltration mis par le front pour traverser les 40cm de l'éprouvette. Le taux d'infiltration se réduit de plus en plus avec l'augmentation du pourcentage de l'argile, avec l'augmentation de la teneur en eau dans les échantillons et aussi avec l'ajout de la paille sèche. Ainsi pour les séguias de Hanabou à sec, avec 25% d'argile par exemple, on a une diminution de 79,25% de la première pente de la courbe et 87,65% de la deuxième pente par rapport à l'échantillon seul compacté à teneur en eau nulle. Avec 5% d'humidité, on a 85,44% et 88,01% de diminution à 25% d'argile par rapport à l'échantillon seul. A 10% d'humidité on a une diminution 90,20% et 90,12% pour les deux taux de cet échantillon plus 25% d'argile par rapport au sol d'origine. Si on mélange l'échantillon de Hanabou à l'argile à la paille, on va enregistrer des diminutions en fonction de la teneur en eau et du pourcentage d'argile. Par exemple, une diminution de 83,91% et 94,84% avec 20% d'argile et une teneur en eau nulle pour les deux taux. 89,02% et 94,99% avec 5% d'humidité et 20% d'argile pour les deux taux 92,28% et 95,57% avec 10% d'humidité et 20% d'argile par rapport à l'échantillon seul compacté et à sec.

La texture du sol aussi, a une influence sur les résultats. L'échantillon de la séguia Jdid qui comporte plus d'éléments fins a enregistré des temps d'infiltration plus importants que celui de Hanabou et Lgdima. Le compactage constitue un élément nécessaire pour augmenter le temps d'infiltration. L'argile a un pouvoir de rétention important quand il occupe une portion importante dans l'échantillon.

Conclusions et recommandations

Le périmètre de la Petite et Moyenne Hydraulique de la province de Jorf-Arfoud rencontre des difficultés sur la disponibilité de la ressource hydrique qui est due principalement à la surexploitation. Pour l'irrigation, les principaux problèmes rencontrés sont l'évaporation de l'eau due aux fortes températures et les grandes pertes d'eau par infiltration à travers les canaux en terre et les fissurations dans les canaux bétonnés au cours de l'adduction et la distribution de l'eau. Notre étude qui était un travail expérimental avait pour objectif d'apporter une contribution à l'amélioration de l'efficacité de transport et de distribution dans les séguias en terre.

Les résultats de ce travail ont permis de déduire que :

- ✓ Les pertes par infiltration enregistrés dépendent d'une part de la texture du sol. En effet l'échantillon de la séguia Lhart Jdid qui contient plus d'éléments fins enregistre moins de pertes que ceux de Lgdima et Hanabou ;
- ✓ Le compactage qui est une procédure mécanique contribue également à la réduction importante de la porosité du sol. Ce dernier permet le tassement du sol et ainsi diminue l'infiltration de l'eau ;
- ✓ L'écoulement de l'eau se fait à deux taux d'infiltration différents ;
- ✓ L'ajout des différents pourcentages d'argile au sol d'origine réduit considérablement les vitesses d'infiltration. Cette diminution dépend de la quantité d'argile ajoutée. Plus la quantité d'argile augmente, plus le temps d'infiltration est grand et donc la vitesse d'infiltration diminue ;
- ✓ La variation de la teneur en eau de l'échantillon avant la mise en eau donne des résultats différents. L'échantillon à sec a enregistré un temps d'infiltration inférieur à celui ayant un taux d'humidité de 5% et 10%. Plus le taux d'humidité se rapproche de la saturation plus le temps d'infiltration augmente et les taux diminuent ;
- ✓ le paillage est une technique de conservation d'eau et des sols. Il permet d'augmenter la quantité d'eau disponible dans le sol et ainsi prévient l'érosion et la dégradation du sol. Cependant, l'utilisation de la paille et de l'argile mélangées avec le sol d'origine à sec ou avec une certaine humidité permettent de ralentir la vitesse d'infiltration.

En conclusion, on peut dire qu'un revêtement à base de sol d'origine mélangé avec un matériau cohésif comme l'argile qui servira de liant avec une faible proportion et soumis à une énergie de compactage suffisante pourrait être appliqué dans les opérations de réhabilitation des canaux. Ceci contribuera à diminuer les pertes par infiltration et ainsi à l'amélioration de l'efficacité de transport et de distribution de l'eau dans les canaux d'irrigation en PMH.

A partir de l'ensemble des résultats obtenus, des recommandations méritent d'être soulevées à savoir :

- ✓ Utiliser 15% d'argile mélangée avec le sol d'origine, avec 5% d'humidité lors de la réalisation des canaux. Grâce à ce taux d'argile, nous allons limiter le gonflement de l'argile et donc éviter les fissurations à long terme.
- ✓ Utiliser une énergie de compactage importante pour assurer une meilleure cohésion du sol ;
- ✓ L'utilisation de la paille dans le mélange contribue à la diminution de la vitesse d'infiltration dans le sol ;
- ✓ Transférer les résultats obtenus par cette étude sur le terrain en procédant au revêtement de séguia témoin dans le périmètre de Jorf par des matériaux testés au laboratoire et refaire les mesures de débit et d'infiltration afin de valider ces résultats et s'assurer que le matériau de revêtement résiste à l'érosion;
- ✓ Appliquer les résultats de ce travail dans le revêtement des canaux d'irrigation en terre dans la PMH, au moins pour les séguias tertiaires qui ne sont pas parfois incluses dans les programmes habituels d'aménagement ;
- ✓ Impliquer l'ensemble des usagers et mettre en place un encadrement technique, tout en organisant des séances de démonstration sur terrain et des séances de formation de vulgarisation et d'encouragement des actions de revêtement des réseaux d'irrigation par le matériau sol et leur maintenance ;
- ✓ Poursuivre les recherches dans le but de mieux améliorer l'efficacité et vérifier l'impact des autres paramètres hydrauliques ;
- ✓ Appliquer les essais d'infiltration pour d'autres matériaux tels que la bentonite et la chaux combinées pour éviter les fissurations dues à l'argile après humidification et séchage ou les déchets plastiques ou autres matériaux similaires.

Références bibliographiques

Abdellaoui, R. (1986). Quelques réflexions sur la problématique du réaménagement des petits et moyens périmètres. Homme Terre et Eaux. Volume 16, N° 63.

Bendada, H. (Décembre 2000). Aménagement hydro- agricole au Macor et secteur. Revue HTE (Homme, Terre et Eau) de l'ANAFIDE.

El Bouari, A. (2004). Conception partie de l'irrigation collective Déroulement des études de réhabilitation de la petite et moyenne hydraulique au Maroc. Projet WADEMED du programme INCOWADEMED. [En ligne] Actes du séminaire Modernisation de l'Agriculture Irrigué Rabat, 19 au 23 Avril 2004. [Citation : 13 Avril 2013.] <http://www.wademed.net/Articles/502Bouari.pdf>. 9p

Ennabbagui, H. (Avril 2015). Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Rural, Diagnostic de l'efficience des canaux d'irrigation en terre dans la Petite et Moyenne Hydraulique.

Farid Ait Rais, I. (2013). Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Rural, contrôle et évaluation des performances des ouvrages hydrauliques.

Jaraich, Z. (Mars 2007). Irrigation et Gestion participative des ressources en eau, cas des PMH de la province de Taza. Revue Homme Terre et Eau N° 136.

Gray, (1972). Manuel des principes d'hydrologie. Comité canadien de la décennie hydrologique internationale, Ottawa, Canada.

Kraatz, D. (1977). Revêtement des canaux d'irrigation. Rome Collection FAO : mise en valeur des terres et des eaux.

Laith, S. (2008). La petite et moyenne hydraulique (PMH): les enseignements tirés et réflexions pour de nouvelles orientations. Revue HTE (Homme terre et eaux) de l'ANAFIDE, Décembre 2008, revue N° 14, p.31-33.

Llamas, J. (1993). Hydrologie générale : principes et applications. 2e édition. Gaétan Morin. Boucherville.

Ministère de l'agriculture et de la pêche (Juillet 2008). Note de synthèse le sur développement de la Petite et Moyenne Hydraulique.

Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, (2014). Situation de l'Agriculture Marocaine

Musy, A. et Soutter, M. (1991). Physique des sols. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Ourahou, M. (Avril 2004). Revêtement des canaux d'irrigation, ORMVA de Tafilalt.

Pascon P. (1984). Question hydraulique, La petite et moyenne hydraulique, volume 1.

Radoui, H. (2013). Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Rural, Evaluation de l'efficience des réseaux d'irrigation après les aménagements hydro-agricoles dans quelques périmètres irrigués de petite et moyenne hydraulique.

Zaghloul, L. (1981). La petite et moyenne hydraulique au Maroc. Homme Terre et Eaux. Volume 11, N°44, page 23.33.

Young, M. and Zhu, J. (2008). Applying Polyacrylamide (PAM) to Reduce Seepage Loss of Water Through Unlined Canals, page 24.

Iqbal, Z. and Maclean, R. (2002). Seepage losses from irrigation canals in southern Alberta, Canadian Biosystems engineering, volume 44.

Som, S. Sarkar and Majumder, R (2004). Geo synthetic Reinforced Canal Systems and Irrigation Structures, Proceedings Water Energy 2004, pp 262 to 274.

Annexes

Annexe 1:Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à sec

Séguia Lgdima à 0% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	8	375	35	11	273	35	19	158	35	30	100	35	40	75
26	30	245	30	32	143	30	43	125	30	140	27	30	150	27
23	41	164	26	56	100	23	90	89	25	305	18	25	420	11
15	80	123	15	150	70	20	119	62	20	490	16	11	1465	8
7	124	109	8	219	61	15	186	45	15	705	14	6,5	1840	7
0	164	105	5	250	58	5	378	31	5	1310	10	4	2100	6
			0	305	55	0	499	25	0	1685	8	0	2510	6

Annexe 2: Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 5% d'humidité

Séguia Lgdima à 5% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	15	200	35	18	167	35	48	63	35	53	57	35	67	45
30	58	70	30	80	48	30	143	32	30	152	30	30	225	19
25	115	53	25	188	28	24	290	24	25	303	20	20	855	10
20	180	46	20	320	23	21	380	20	23,5	350	19	10	1665	7
15	256	39	17	406	21	11,5	725	17	16	687	13	7,5	1926	6
12,5	295	38	7	740	18	5	995	14	5	1350	10	5	2230	5
0	570	27	5	815	16	0	1233	13	0	1810	7	0	2930	4
			0	1035	14									

Annexe 3 : Tableau de mesure de l'infiltration et taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lgdima à 10% d'humidité

Séguia Lgdima à 10% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	18	167	35	45	67	35	45	67	35	61	49	35	75	40
30	62	68	30	135	33	30	215	18	30	240	17	28	300	19
25	125	48	25	285	20	21	790	9	22	702	10	22	675	10
20	207	37	19,5	475	17	13	1525	7	15	1322	7	15	1395	6
15	306	30	7,5	995	14	7	2201	5	10	1830	6	10,5	2100	4
10	420	26	4	1165	12	0	3313	4	7	2265	5	6	3040	3
0	670	24	0	1400	10	0			0	3470	3	3	3570	3
												0	4170	3

Annexe 4 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à sec

Séguia Hanabou à 0% d'humidité											
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0	
35	6	500	35	7	429	35	14	214	35	25	120
30	23	176	30	31	125	30	60	65	30	90	46
25	45	136	25	75	68	25	133	41	25	205	26
20	71	115	20	122	64	20	248	26	20	350	21
15	101	100	15	170	63	2	725	23	11	635	19
10	137	83	10	219	61	0	782	21	0	1042	16
5	175	79	5	270	59						
0	213	79	0	326	54						

Annexe 5 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 5% d'humidité

Séguia Hanabou à 5% d'humidité											
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0	
35	11	273	35	23	130	35	30	100	35	40	75
30	43	94	30	73	60	30	91	49	30	128	34
25	90	64	25	137	47	23	203	38	25	240	27
14	230	47	20	210	41	20	256	34	22,5	305	23
10	290	40	15	290	38	17	315	31	14	606	17
7,5	330	38	10	381	33	15	358	28	10	755	16
0	460	35	1	585	26	6	586	24	5	960	15
			0	608	26	0	750	22	0	1160	15

Annexe 6 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou à 10% d'humidité

Séguia Hanabou à 10% d'humidité											
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0	
35	23	130	35	26	115	35	32	94	35	51	59
30	70	64	30	72	65	30	93	49	30	190	22
25	130	50	25	136	47	25	205	27	25	375	16
20	205	40	20	220	36	20	325	25	16	748	14
15	290	35	15	310	33	15	460	22	3	1350	13
10	380	33	10	405	32	10	605	21	0	1505	12
5	478	31	5	505	30	7,5	675	21			
0	580	29	0	607	29	0	885	21			

Annexe 7 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à sec

séguia Lhart Jdid à 0% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	16	188	35	25	120	35	35	86	35	42	71	35	44	68
30	69	57	30	78	57	30	122	34	30	163	25	30	162	25
25	135	45	25	145	45	23,5	386	15	25	350	16	25	340	17
17	262	38	17,5	285	32	20	569	11	20	589	13	18	629	15
15	294	38	15	335	30	16	826	9	14	956	10	4,5	1270	13
10	380	35	10	458	24	6	1637	7	12,5	1061	9	0	1506	11
5	472	33	5	598	21	0	2249	6	11	1170	8			
0	573	30	0	743	21				3,2	1967	6			
									0	2411	4			

Annexe 8 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 5% d'humidité

Séguia Lhart Jdid à 5% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	41	73	35	44	68	35	47	64	35	47	64	35	55	55
30	165	24	30	170	24	30	180	23	29	208	22	28	214	26
27,5	238	21	25	360	16	25	395	14	22	522	13	20,5	528	14
21,5	513	13	17,5	770	11	22	555	11	18,5	749	9	17,7	684	11
11	1169	10	9	1422	8	13,5	1181	8	14	1190	6	16	792	9
7,5	1466	7	5	1842	6	8,5	1661	6	10	1671	5	10	1362	6
5,5	1674	6	0	2502	5	4,3	2171	5	5	2321	5	2	2301	5
0	2275	5				0	3041	3	0	3221	3	0	2535	5

Annexe 9: Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité

séguia Lhart Jdid à 10% d'humidité														
5% d'argile			10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile			25% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0		40	0		40	0	
35	60	50	35	50	60	35	80	38	34	65	55	35	59	51
30	166	28	30	184	22	30	235	19	30	225	15	30	206	20
26,5	280	18	25	400	14	23	597	12	20	945	8	25	415	14
20	595	12	14	1198	8	14	1377	7	16	1295	7	22,5	535	13
13	1253	6	7,5	1852	6	7	2120	6	9	2235	4	16,5	955	9
5	2310	5	2	2510	5	3	2690	4	4	3110	3	12	1320	7
0	2860	5	0	2950	3	0	3310	3	0	3890	3	7	1840	6
												0	2690	5

Annexe 10 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à sec

Séguia Hanabou avec 150g de paille à 0% d'humidité								
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0	
35	10	300	35	15	200	35	22	136
30	65	55	30	68	57	30	84	48
25	193	23	25	160	33	27,5	145	25
15	550	17	16	570	13	21	410	15
5	1027	13	7	1150	9	17	635	11
0	1400	8	3,6	1383	9	10	1290	6
			0	1656	8	6	1745	5
						0	2465	5

Annexe 11: Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 5% d'W

Séguia Hanabou avec 150g de paille à 5% d'humidité								
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0	
35	30	100	35	38	79	35	45	67
30	118	34	30	119	37	30	170	24
22	350	21	23,5	296	22	25	335	18
20	416	18	15	660	14	20	570	13
11	763	16	10	1070	7	17	765	9
5	1150	9	4	1840	5	10	1520	6
0	1740	5	0	2320	5	5	2150	5
						0	2780	5

Annexe 12 : Tableau de mesure de l'infiltration et du taux d'infiltration dans l'échantillon de la séguia Hanabou mélangé à la paille et à 10% d'humidité

Séguia Hanabou avec 150g de paille à 10% d'humidité								
10% d'argile			15% d'argile			20% d'argile		
Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration	Cote (cm)	Temps (min)	Taux d'infiltration
40	0		40	0		40	0	
35	38	79	35	45	67	35	52	58
30	133	32	30	157	27	30	182	23
20	445	19	24,5	375	15	25	378	15
15	645	15	15	820	13	22	550	10
10	895	12	11	1050	10	16	950	9
5	1345	7	4	1950	5	10	1460	7
0	1875	6	0	2440	5	5	2150	4
						0	2900	4

المملكة المغربية

ROYAUME DU MAROC

INSTITUT AGRONOMIQUE
ET VÉTÉRINAIRE HASSAN II



معهد الحسن الثاني
للزراعة والبيطرة

مشروع نهاية الدراسات لنيل دبلوم مهندس دولة في الهندسة القروية
تخص، السقي، تدبير الماء و البيئة

تجارب لدراسة تسرب التربة لهدف تحسين فاعلية قنوات السقي في المدارات
الهيدروليكية
الصغرى والمتوسطة في جهة مكناس-تافيلالت
(حالة جرف ارفود)

قدم للعموم ونوقش من طرف

أوى نكوم

أمام اللجنة المكونة من

الأستاذ ع. حماني معهد الحسن الثاني للزراعة و البيطرة رئيس

الأستاذ م. بقاش معهد الحسن الثاني للزراعة و البيطرة مقرر

الأستاذة ر. بورزيزة معهد الحسن الثاني للزراعة و البيطرة ممتحنة

الأستاذ م. النعيمي معهد الحسن الثاني للزراعة و البيطرة ممتحن

يوليو 2015