

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie Civil et Hydraulique  
Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية و الري  
المرجع: .....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Magister**  
**En Hydraulique**  
**Option**  
**Hydraulique Urbaine**

**Etude Expérimentale Du Processus De  
Ruissellement Sous Pluies Simulées**

Présenté par :  
**Madi Meriem**

Soutenu publiquement le : 26-04-2012

**Devant le jury composé de :**

<b>Dr. Debabech Mahmoud</b>	<b>Pr</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. Benkhaled Abd Elkader</b>	<b>Mc</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. Houichi Larbi</b>	<b>Mc</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna</b>
<b>Dr. Youcef Leila</b>	<b>Pr</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>



## *REMERCIEMENTS*

Ce travail n'aurait pas abouti sans mon directeur de mémoire : 'Dr Benkhaled Abd Elkader' qui y a participé avec ardeur en me procurant sa précieuse aide et en m'éclairant par ses conseils. Je le remercie vivement.

J'exprime également ma gratitude et mon profond respect à l'égard du Pr 'Debabech Mahmoud' de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux jurys : 'Dr Lahouichi Elarbi' et 'Dr Youcef Leila', d'avoir accepté de faire partie du jury et pour leurs critiques constructives.

Que mes enseignants ainsi que mes collègues de la poste graduation, trouvent également l'expression de mon profond respect à travers ces lignes.

## ملخص

الهدف الرئيس من هذا العمل هو تحسين فهم كيفية النظام الهيدرولوجي .و لتحقيق هذا الهدف ، أسست هذه الدراسة داخل حوض اصطناعي لمراقبة وقياس الظواهر الهيدرولوجية المتحركة في الفيضانات.

الجهاز التجريبي المستعمل عبارة عن نموذج تجريبي مصغر للنظام الهيدرولوجي مجهز بمحاكي لهطول الأمطار .أجريت التجارب على وسط معادل للرمال طميي. تسمح هذه الدراسة بمعرفة مدى تأثير مختلف عوامل الحوض على الاستجابة الهيدرولوجية.في إطار المقارنة بين التجارب المنجزة ، حاولنا دراسة كل من هذه المعالم على حد كالمطوية الأولية للتربة ، الانحدار، شدة التساقط و الغطاء النباتي . في فيد هذه الدراسة سلطنا الضوء أيضا على التقسيم البياني لبيانات التدفق الناتجة عن التجارب .

**المفاتيح:** دراسة تجريبية ، السيلان ، نفاذية، شدة التساقط، محاكي لتساقط الامطار، حوض هيدرولوجي تجريبي

## **Abstract**

The main objective of this work is to improve understanding of the hydrological functioning of catchment basin. To achieve this objective this study is built primarily on observation and measurement in side of an artificial basin to control the generation of floods by hydrological phenomen.

The experimental device used is a hydrologic test bench in the laboratory of department of hydraulics, as a model of the hydrological system with a rainfall simulator . Tests were performed on a medium equivalent to silty sand.

This work has been identified the influence of various parameters on the basin's hydrologic response. In the context of comparing the tests realized we tried to study the role of each individual parameter the antecedent soil moisture, slope, rainfall intensity and vegetation cover.

We also highlight in the case of this study, the graphical separating hydrographs resulting of the tests realized.

**Keywords** : Experimental study, Runoff, infiltration, Intensity of the rain, Rainfall simulator, Hydrologic test bench.

## **Résumé**

L'objectif principal de ce travail est l'amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants. Afin d'atteindre cet objectif cette étude est construite essentiellement sur l'observation et la mesure à l'intérieur d'un bassin artificiel, des phénomènes hydrologiques contrôlant la génération des crues.

Le dispositif expérimental utilisé est un banc d'essai d'hydrologie utilisé au laboratoire de département d'hydraulique comme modèle réduit du système hydrologique muni d'un simulateur de pluie. Les essais ont été réalisés sur un milieu équivalent à du sable limoneux .

Ce travail a permis d'identifier l'influence des différents paramètres du bassin sur ses réactions hydrologiques. Dans le cadre de comparaison des essais réalisés nous avons essayé d'étudier individuellement le rôle de chaque paramètre à savoir l'humidité antécédente du sol, la pente, l'intensité pluviométrique et le couvert végétale.

Nous avons aussi mis en évidence dans le cas de cette étude, la décomposition graphique des hydrogrammes résultants des essais réalisés.

**Mots clé :** Etude expérimentale - Ruissellement – Infiltration – Intensité de la pluie – Simulateur de pluie – Banc d'essai d'hydrologie.

# Table des matières

## Liste des Illustrations Introduction Générale

---

### *Revue de littérature*

---

#### **Chapitre 1. Considérations Générales sur les Processus Hydrologiques**

1.1 Introduction	16
1.2. Définitions des processus hydrologiques	16
1.3. Les différents types de processus hydrologiques	17
1.3.1. Précipitations	17
1.3.2. Evaporation	17
1.3.3. Evapotranspiration	18
1.3.4. Interception	18
1.3.5. Ruissellement	18
1.3.6. Infiltration	19
1.3.7. Percolation	19
1.3.8. Emmagasinement	19
1.3.9. L'écoulement	20
1.4. Les mécanismes de ruissellement	20
1.4.1. Précipitations directes à la surface de l'eau	22
1.4.2. Les écoulements de surface	22
1.4.2.1. Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration	22
1.4.2.2. Ecoulement sur sol saturé	22
1.4.3. Ecoulement de subsurface (hypodermique)	24
1.4.4. Ecoulement par effet piston	25
1.4.5. Ecoulement par macropores	26
1.4.6. Ecoulement par intumescence de nappe	27
1.4.7. Ecoulement de retour	28
1.4.8. Ecoulement souterrain	29
1.4.9. Ecoulement du à la fonte des neiges	29
1.5. Interactions des processus d'écoulement	30
1.5.1. L'écoulement direct	30
1.5.2. Le débit de base	30
1.6. Conclusion	30

#### **Chapitre 2. Le Ruissellement**

2.1. Introduction	31
2.2. Définition	31
2.3. Les formes de ruissellement	32
2.4. Les facteurs de ruissellement	33
2.4.1. Facteurs externes	33
2.4.1.1.1. Influence de la durée et l'intensité de la pluviométrie	33
2.4.1.1.2. Influence de la distribution spatiale	35
2.4.1.1.3. Direction de l'orage	36
2.4.1.1.4. Type d'orage	36

2.4.1.1.5. Forme et dimension du bassin versant	36
2.4.2. Facteurs internes	37
2.4.2.1. Les facteurs topographiques	37
2.4.2.2. Distribution des cours d'eau	37
2.4.2.3. La pente	37
2.4.2.3.1. Pente du cours d'eau principal	37
2.4.2.3.2. Pente générale du bassin	37
2.4.2.4. Nature et géologie du sol	38
2.4.2.5. Stockage ou emmagasinement	38
2.4.2.6. Importance des conditions des conditions antécédentes d'humidité	39
2.5. L'hydrogramme de crue	40
2.5.1. Définition	40
2.5.2. Composantes de l'hydrogramme de crue	40
2.5.2.1. Partie ascendantes de l'hydrogramme	40
2.5.2.2. Segment de crête	41
2.5.2.3. Courbe de décrue de l'hydrogramme	41
2.5.3. Les caractéristiques d'un hydrogramme	42
2.5.3.1. Les pluies caractéristiques	42
2.5.3.2. Les temps caractéristiques	42
2.6. L'infiltration	43
2.6.1. Définition	43
2.6.2. Les types d'infiltration	45
2.6.2.1. Infiltration à vitesse constante	45
2.6.2.2. Infiltration de l'eau détenue à la surface du sol	45
2.6.3. Les facteurs influençant l'infiltration	46
2.7. Relation ruissellement –infiltration	46
2.8. Conclusion	47

### **Chapitre 3. La Détermination du Ruissellement**

3.1. Introduction	49
3.2. Les techniques de mesure du débit	49
3.2.1. La mesure des hauteurs d'eau	49
3.2.1.1. Instrument de mesure du niveau d'eau	50
3.2.1.1.1. Limnimètres	50
3.2.1.1.2. Limnigraphe	50
3.2.2. La mesure des débits	51
3.2.2.1. Les méthodes complètes	51
3.2.2.1.1. Les méthodes du moulinet hydrométrique	51
3.2.2.1.2. Méthode du profileur de courant	52
3.2.2.2. Les méthodes incomplètes	52
3.2.2.2.1. Méthodes à Ultrasons	52
3.2.2.2.2. Méthode du bateau mobile	53
3.2.2.2.3. Méthode des flotteurs	53
3.2.2.3. Méthode globales	53
3.2.2.3.1. Méthode électromagnétique	53
3.2.2.3.2. Méthode volumétrique	54



3.2.2.3.3. Seuils jaugeurs	54
3.2.2.3.4. Dilutions chimique	56
3.3. L'établissement de la courbe de tarage	59
3.4. Calcul du débit de ruissellement	59
3.4.1. La méthode rationnelle	59
3.4.2. La nouvelle méthode rationnelle de Turraza	60
3.4.3. La méthode de Caquot	60
3.4.4. La méthode de SCS (Soil Conservation Service)	61
3.5. Conclusion	62
<b>Chapitre 4. Simulation de Pluie</b>	62
4.1 Introduction	63
4.2. Définition	63
4.3. Historique des mesures sous pluies simulées	63
4.4. Dispositifs de simulation	65
4.5. Intérêt des études sous pluies simulées	66
<hr/> <i>Etude Expérimentale</i> <hr/>	
<b>Chapitre 5. Matériel et Méthodes</b>	
5.1. Introduction	68
5.2. Le banc d'essai	68
5.2.1. Généralités	68
5.2.2. Caractéristiques techniques du banc d'essai	69
5.2.3. Description du banc d'essai	70
5.2.4. Fonctionnement du banc d'essai	71
5.3. Le milieu perméable	74
5.4. Méthodologie et protocole expérimentale	74
5.4.1. Manipulation du banc d'essai	74
5.4.2. Les préparatifs avant l'exécution des essais	75
5.4.3. Les conditions aux limites et les conditions initiales	75
5.4.4. Réalisations des Essais	76
5.4.4.1. Introduction	76
5.4.4.2. Essais préliminaires	76
5.4.4.3. Essais de simulation	77
5.6. Conclusion	78
<b>Chapitre 6. Résultats et Interprétions</b>	
6.1. Introduction	79
6.2. Essais préliminaires	79
6.2.1. Analyse des hydrogrammes	79
6.2.2. Analyse des courbes d'infiltration	83
6.3. Essai de simulation	87
6.3.1. Influence de la pente sur la réponse hydrologique	87
6.3.1.1. Cas d'une faible intensité pluviométrique	88
6.3.1.1.1. Analyse des hydrogrammes	88
6.3.1.1.2. Analyse des courbes d'infiltration	89

6.3.1.2. Cas d'une forte intensité pluviométrique	91
6.3.1.2.1. Analyse des hydrogrammes	91
6.3.1.2.2. Analyse des courbes d'infiltration	93
6.3.2. Influence de l'intensité pluviométrique sur la réponse hydrologique	94
6.3.2.1. Analyse des hydrogrammes	94
6.3.2.2. Analyse des courbes d'infiltration	95
6.3.3. Influence de la couverture végétale et la rétention en surface	101
6.3.3.1. Analyse des hydrogrammes	102
6.3.3.2. Analyse des courbes d'infiltration	102
6.4. Décomposition des hydrogrammes	112
6.4.1. Introduction	112
6.4.2. Décomposition de la série A	112
6.4.3. Décomposition de la série B	116
6.4.3. Décomposition de la série C	119
6.4.5. Comparaison des cas extrêmes	123

## **Conclusion Générale**

## **Référence bibliographique**

## Table des Illustrations

### Tiste des Figures

<b>Figure 1.</b>	Les processus hydrologiques.	16
<b>Figure 2.</b>	Rôle de l'infiltration dans le transfert d'eau à travers les couches du sol.	19
<b>Figure 3.</b>	Principaux processus d'écoulement .	21
<b>Figure 4.</b>	Écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (a) et écoulement par saturation (b) .	23
<b>Figure 5.</b>	Extension du réseau hydrographique et des surfaces saturées durant une crue pour quatre(04)pas de temps(D'après Kirby, 1978)	24
<b>Figure 6.</b>	Écoulement par macropores	27
<b>Figure 7.</b>	Illustration du phénomène d'intumescence de la nappe.	28
<b>Figure 8.</b>	Écoulement de retour (inspiré de Musy, 1998)	28
<b>Figure 9.</b>	L'écoulement souterrain en milieu saturé	29
<b>Figure 10.</b>	Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue.	33
<b>Figure 11.</b>	Représentation schématique du bassin versant (d'après Réménérias, 1976)	34
<b>Figure 12.</b>	Influence de la durée de l'averse sur la réponse hydrologique d'un bassin versant (d'après Réménérias, 1976. Les hyétogrammes figurent sur la partie gauche de la figure tandis que les hydrogrammes résultants figurent à droite).	35
<b>Figure 13.</b>	Influence de la distribution spatiale de l'averse sur la réponse hydrologique d'un bassin versant. Les hyétogrammes figurent sur la partie gauche de la figure tandis que les hydrogrammes résultants figurent à droite. (D'après Réménérias, 1976).	36
<b>Figure 14.</b>	Influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant (sol initialement humide en noir et sol initialement sec en gris).	39
<b>Figure 15.</b>	Composantes de l'hydrogramme (d'après Gray et wigham)	40
<b>Figure 16.</b>	Les caractéristiques de l'hydrogramme .	43
<b>Figure 17.</b>	Évolution générale du régime d'infiltration et d'infiltration cumulative au cours du temps (d'après Musy, 2000).	44
<b>Figure 18.</b>	Régime d'infiltration et capacité d'infiltration d'un sol (tiré de Musy et Soutter, 1991)	45
<b>Figure 19.</b>	Différentes possibilités d'infiltration.	46
<b>Figure 20.</b>	Ruissellement et infiltration sous intensité d'averse constante (D'après Lafforgue,1978).	47
<b>Figure 21.</b>	La production d'un hydrogramme (Musy, 2002).	50
<b>Figure 22.</b>	Schéma de la section transversale d'un cours d'eau (d'après document IRD,2007)	52
<b>Figure 23.</b>	Séparation isotopique des écoulements et variation des teneurs isotopiques pour l'événement du 7-8 septembre 1993 (D'après Iorgulescu, 1997)	58
<b>Figure 24.</b>	Le simulateur de pluie de type SWANSON  (Tiré d'A. Casenave et C. Valentin, 1989)	64
<b>Figure 25.</b>	Le simulateur de pluie de type ORSTOM (Tiré de Casenave, 1982)	65
<b>Figure 26.</b>	Dispositif de simulation (d'après le bulletin technique du banc d'essai).	66
<b>Figure 27.</b>	Vue générale du banc d'essai (source : bulletin technique).	69

<b>Figure 28.</b>	Les principaux éléments constitutifs du banc d'essai d'hydrologie.	71
<b>Figure 29.</b>	Schéma de fonctionnement de l'appareil (source : bulletin technique).	72
<b>Figure 30.</b>	Le déversoir à mince paroi	72
<b>Figure 31.</b>	Dispositif de lecture des hauteurs d'eau dans le captage	73
<b>Figure 32.</b>	Tubes piézométriques pour la lecture de la charge d'eau	73
<b>Figure 33.</b>	Hydrogrammes résultants en fonction des conditions antécédentes d'humidité.	79
<b>Figure 34.</b>	Relation entre le taux d'humidité et le pourcentage d'écoulement.	82
<b>Figure 35.</b>	Représentation du débit et l'infiltration de l'essai n°1.	83
<b>Figure 36.</b>	Infiltrabilité du sol dans les six premiers essais au niveau du piézomètre N°6	84
<b>Figure 37.</b>	Relations entre débit maximal et taux d'humidité des essais effectués.	85
<b>Figure 38.</b>	Influence de la pente sur les hydrogrammes de crue résultants sous une intensité de 8l/mn.	90
<b>Figure 39.</b>	Influence de la pente sur la variation de la charge d'eau au niveau des piézomètres sous une intensité de 8l/mn.	90
<b>Figure 40.</b>	Influence de la pente sur les hydrogrammes de crue résultants sous une intensité de 14l/mn.	92
<b>Figure 41.</b>	Influence de la pente sur la variation de la charge d'eau au niveau des piézomètres sous une intensité de 14 l/mn.	92
<b>Figure 42.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes (0%, 2% et 4%) pour un sol initialement très humide.	96
<b>Figure 43.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes 0% ,2% et 4%) (sous sol initialement humide.	96
<b>Figure 44.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes (0%, 2% et 4%) pour un sol initialement sec.	97
<b>Figure 45.</b>	Influence de l'intensité pluviométrique sur le comportement hydrologique.	98
<b>Figure 46.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide sous différente intensité pluviométrique.	99
<b>Figure 47.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide sous différentes intensité pluviométrique.	99
<b>Figure 48.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec sous différentes intensités pluviométriques.	100
<b>Figure 49.</b>	Simulation du processus de ruissellement sur couvert végétal artificiel.	101
<b>Figure 50.</b>	Hydrogrammes résultants pour un sol initialement sec (intensité 8 l/mn) pentes (0 – 2 – 4 %).	104
<b>Figure 51.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement humide pentes 0 – 2 – 4 %).	104
<b>Figure 52.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement très humide (intensité 8 l/mn pentes 0 – 2 – 4 %)	105
<b>Figure 53.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement sec (intensité 14 l/mn) pentes( 0 – 2 – 4 % )	105
<b>Figure 54.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement humide (intensité 14 l/mn pentes 0- ,2- 4% )	106
<b>Figure 55.</b>	Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement très humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 - 2 - 4 %).	106
<b>Figure 56.</b>	Interception d'eau de pluie par un couvert végétal simulé.	107
<b>Figure 57.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec	108

	(intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)	
<b>Figure 58.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide (intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %).	108
<b>Figure 59.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide (intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)	109
<b>Figure 60.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %).	109
<b>Figure 61.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)	110
<b>Figure 62.</b>	Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)	110
<b>Figure 63.</b>	Décomposition des hydrogrammes des essais de la série A	114
<b>Figure 64.</b>	Méthode graphique de détermination du point d'inflexion des hydrogrammes de la série A	115
<b>Figure 65.</b>	Décomposition des hydrogrammes des essais de la série B	117
<b>Figure 66.</b>	Méthode graphique de décomposition du point d'inflexion des hydrogrammes des essais de la série B	118
<b>Figure 67.</b>	Décomposition des hydrogrammes des essais de la série C	121
<b>Figure 68.</b>	Méthode graphique de décomposition du point d'inflexion des hydrogrammes des essais de la série C	122

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.</b>	Les principaux seuils utilisés (d'après A. Wyss. modifié).	55
<b>Tableau 2.</b>	Comparaison des deux méthodes de jaugeage chimique.	56
<b>Tableau 3.</b>	Conditions expérimentales des essais préliminaires.	77
<b>Tableau 4.</b>	Protocole de simulation.	78
<b>Tableau 5.</b>	Valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des essais préliminaires.	80
<b>Tableau 6.</b>	Volumes écoulés des six simulations.	82
<b>Tableau 7.</b>	Protocole des mesures d'infiltration pendant les essais.	83
<b>Tableau 8.</b>	Influence de l'état d'humidité antécédente sur le débit maximal.	85
<b>Tableau 9.</b>	Conditions expérimentales et variables mises en jeu Pour démontrer l'influence de la pente.	87
<b>Tableau 10.</b>	Variations de l'infiltration maximale du sol sec en fonction de la pente.	93
<b>Tableau 11.</b>	Conditions expérimentales et variables mises en jeu pour démontrer l'influence de l'intensité pluviométrique.	94
<b>Tableau 12.</b>	Protocole expérimental pour l'étude du rôle du couvert végétal sur la réponse hydrologique.	102
<b>Tableau 13.</b>	Conditions expérimentales pour la série A.	113
<b>Tableau 14.</b>	Volumes totaux des eaux ruisselées et des eaux souterraines des essais de la Série A.	113
<b>Tableau 15.</b>	Conditions expérimentales pour la série B.	116
<b>Tableau 16.</b>	Volumes totaux des eaux ruisselées et des eaux souterraines des essais de la Série B.	119
<b>Tableau 17.</b>	Conditions expérimentales pour la série C.	120
<b>Tableau 18.</b>	Volumes totaux Des eaux ruisselées et des eaux souterraines des essais de la Série C .	120
<b>Tableau 19.</b>	Conditions de réalisation des deux essais N°2 et N°14.	123



*Introduction*

*Générale*

## INTRODUCTION GENERALE

L'hydrologie se définit comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. Elle joue un rôle capital dans le domaine de l'ingénierie et des sciences environnementales. Elle concerne aussi bien les mécanismes d'écoulement des eaux dans les systèmes naturels (bassin versant) ou anthropisés (zones industrielles ou urbanisées). Elle permet de traiter essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.

La pluie est un processus hydrologique moteur des mécanismes de genèse de crue, qui se caractérise par une grande variété de tailles de gouttes et de débits, et son estimation est l'une des questions scientifiques majeures. Ses effets sont suffisamment importants pour qu'il soit intéressant de reproduire de manière artificielle les différents types de pluie.

Les mécanismes qui contrôlent le devenir à court terme des eaux de pluie se partageant en ses composantes : ruissellement de surface, infiltration, interception, et évapotranspiration sont encore insuffisamment compris. Une meilleure connaissance de la contribution des écoulements rapides de pointe de crue serait souhaitable. Il semble clair que le comportement global du bassin ne peut être que le résultat des processus se déroulant dans les versants qui le constituent. Ceci représente un enjeu majeur en hydrologie dont on ne saurait y répondre de manière réaliste qu'en se fondant sur un des aspects de la démarche scientifique, celui de l'observation expérimentale.

L'objectif principal de ce travail est l'amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants. Afin d'atteindre cet objectif cette étude est construite essentiellement sur l'observation et la mesure à l'intérieur d'un bassin artificiel, des phénomènes hydrologiques contrôlant la génération des crues.

L'essentiel du travail a donc consisté en l'étude de l'importance relative des paramètres considérés, à savoir : l'humidité initiale, la pente, l'intensité pluviométrique et le couvert



végétal. Un des aspects non négligeable de l'étude des crues est la décomposition graphique des hydrogrammes résultants.

La méthodologie adoptée utilise les principes de la simulation de pluie et la détermination du débit de ruissellement par un déversoir à paroi mince. Un suivi, sous pluies artificielles, du fonctionnement hydrologique d'un bassin constitué de sable limoneux, est effectué au sur banc d'essai au laboratoire d'Hydraulique, en combinant deux séries d'expérimentation, les essais préliminaires et les essais de simulation. Les premiers pour s'assurer de la fonctionnalité du banc d'essai, tandis que les seconds étaient réalisés dans le but d'approfondir les connaissances sur la relation chute de pluie-écoulement.

Le mémoire est divisé en deux parties principales :

La première partie est une revue de littérature sur le sujet composée de 04 chapitres :

Le 1<sup>er</sup> chapitre « Considérations Générales sur les Processus Hydrologiques » est une présentation classique des processus hydrologiques intervenant dans un bassin versant ;

Le 2<sup>ème</sup> chapitre « Ruissellement » décrit les différents mécanismes de genèse de crue et les paramètres influençant la réponse hydrologique d'un bassin versant;

Le 3<sup>ème</sup> chapitre « Détermination du ruissellement » rapporte les différentes méthodes pratiques de détermination du débit et de tracé des hydrogrammes ;

Le 4<sup>ème</sup> chapitre « Simulation de pluie » s'intéresse à l'historique de la simulation de pluie et l'intérêt des études sous pluie simulées.

La seconde partie est l'étude expérimentale qui comporte :

Le 5<sup>ème</sup> chapitre « Matériel et méthodes » comprend la description du banc d'essai, la méthodologie suivie pendant les essais et la réalisation des essais ;

Le 6<sup>ème</sup> chapitre « Résultats et interprétations » rapporte les analyses des essais réalisés suivi d'une décomposition graphique des hydrogrammes résultants.

Une conclusion rapporte les principaux résultats ainsi que les éventuelles perspectives



*Revue*

*de*

*Littérature*

# Chapitre 1. Considérations Générales sur les Processus Hydrologiques

## 1.1 Introduction

A l'échelle du bassin versant, le cycle de l'eau fait intervenir des interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère, ainsi que la redistribution latérale d'eau entre les différentes composantes du système, en fonction du régime des précipitation, conditions locales ou de la saison.

L'hydrologie s'intéresse à la distribution et à la circulation de l'eau dans la nature (Marchandise 2007). L'objectif de ce chapitre est de présenter brièvement l'état de l'art de l'hydrologie fondamentale ou plus précisément de l'étude des processus hydrologiques.

## 1.2. Définitions des processus hydrologiques

Les processus hydrologiques sont les principaux phénomènes composant du cycle de l'eau parmi les quels nous citons les précipitations, l'évaporation, l'évapotranspiration, l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique figure 1. Ces processus régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin.

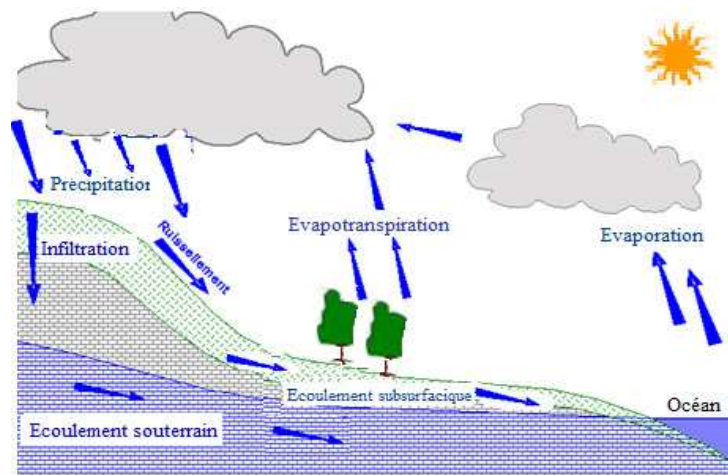


Figure 1. Les processus hydrologiques.

## 1.3. Les différents types de processus hydrologiques

### 1.3.1. Précipitations

Nous unissons sous le terme « précipitation » toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Quelque soit le type de la précipitation, sa mesure s'effectue par le pluviographe ou le pluviomètre. La pluie est l'élément fondamental du cycle hydrologique puisqu'elle en constitue le paramètre d'entrée. La quantité d'eau mesurée dépend de la situation des instruments sur le terrain, des conditions météorologiques (vent, température et ensoleillement), de l'instrument lui-même ainsi que de la topographie du bassin et de son altitude.

### 1.3.2. Evaporation

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant elle se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les principales conditions régissant l'évaporation sont les facteurs météorologiques (température, pression, humidité de l'air, rayonnement solaire)

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Ces méthodes peuvent être divisées en trois grandes catégories:

- **Mesures directes de l'évaporation** en certains sites de mesures. L'extrapolation de ces mesures ponctuelles à une région se fait, en général, par des coefficients d'ajustements.
- **Méthodes empiriques** qui sont le résultat d'un traitement statistique des observations disponibles concernant certains éléments physiques ou atmosphériques facilement mesurables, qui expliquent l'évaporation. Des analyses de corrélation conduisent à développer des relations mathématiques entre ces éléments et l'intensité et la variabilité de l'évaporation.
- **Méthodes analytiques** qui font appel au bilan énergétique.

### 1.3.3. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est facteur de la demande en eau de l'atmosphère laquelle sera d'autant plus importante que l'hygrométrie atmosphérique sera plus basse. La hauteur de lame d'eau ainsi évapotranspirée sur un bassin versant pendant une période déterminée, correspond à toute l'eau évaporée par les plans d'eau, les sols etc. et transpirée par le couvert végétal au cours de cette période.

L'évapotranspiration potentielle (Etp) désigne le maximum possible que peut atteindre l'évapotranspiration pour une surface donnée et pour une situation météorologique définie. Si la somme des précipitations est supérieure à la quantité d'eau qui aurait dû être évapotranspirée, on parlera d'excédent hydrique pour la région. Il y aura déficit quand l'Etp dépasse la quantité d'eau apportée par les précipitations.

### 1.3.4. Interception

L'interception représente donc une fraction non négligeable du bilan hydrologique et se relève être une composante essentielle du bilan en zone forestière.

L'interception verticale des précipitations, définie comme la fraction de l'eau qui n'atteint jamais le sol. Les auteurs anglo-saxons parlent le plus souvent de « interception losses » soit littéralement « pertes par interception ». De façon analytique, les pertes par interception s'expriment par la relation suivante :

$$I = P_i - (P_s + P_t) \quad [1]$$

Où :

I : interception (pluie n'atteignant jamais le sol) [mm],

P<sub>i</sub> : pluie incidente [mm],

P<sub>s</sub> : pluie atteignant le sol drainée au travers du couvert végétal (canopée) [mm],

P<sub>t</sub> : pluie atteignant le sol par écoulement le long des branches et des troncs [mm].

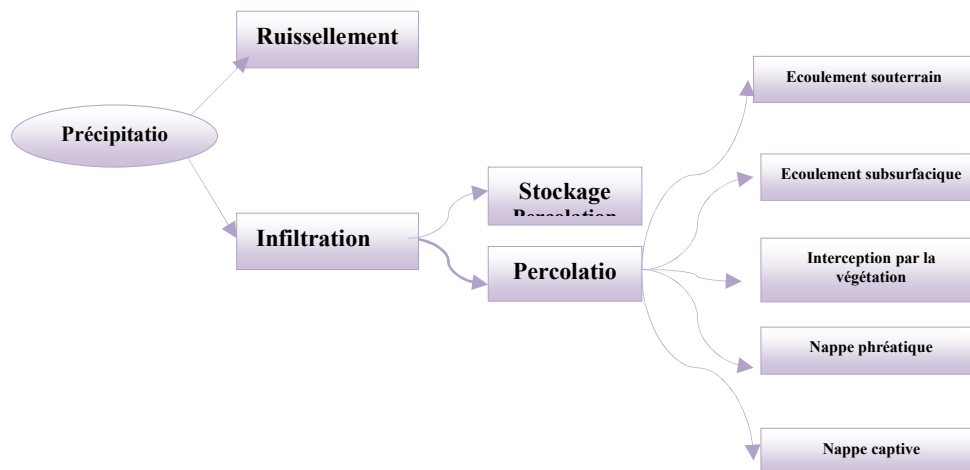
### 1.3.5. Ruissellement

Généralement on utilise le terme de ruissellement pour décrire la circulation de l'eau qui se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique, que cette circulation soit connectée, ou non, à un drain permanent.

Autrement dit le ruissellement correspond à la circulation des eaux de pluie à la surface du sol.

### 1.3.6. Infiltration

L'infiltration est l'un des phénomènes les plus importants de l'hydrologie et l'un des plus difficiles à mesurer avec précision. La notion d'infiltration qualifie en hydrologie le processus de transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol et verticalement vers le bas lorsque ce sol reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion (Musy, 2000) La figure 2 illustre ce concept. Selon l'intensité de la pluie, l'eau peut s'infiltrer si l'intensité pluviométrique est inférieure au taux d'infiltration du sol, sinon elle peut s'accumuler et s'écouler sous forme de ruissellement de surface.



**Figure 2.** Rôle de l'infiltration dans le transfert d'eau à travers les couches du sol.

### 1.3.7. Percolation

La percolation est 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.

### 1.3.8. Emmagasinement

L'eau de stockage comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse.

La quantité d'eau susceptible d'être interceptée varie considérablement. Si la végétation offre une grande surface basale ou foliaire, donc un important degré de couverture, la rétention

d'eau peut atteindre jusqu'à 30% de la précipitation totale pour une forêt mixte, 25% pour les prairies et 15% pour les cultures.

### **1.3.9. L'écoulement**

L'écoulement représente une partie essentielle du cycle hydrologique. Il se trouve en diversité de forme, on distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les écoulements « rapides » et par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de « lents ». Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface et écoulement de subsurface. L'écoulement souterrain joue un rôle important dans le cycle hydrologique par le fait de génération des crues. Il désigne le mouvement de l'eau dans le sol. Ces eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol.

### **1.4. Les mécanismes de ruissellement**

Globalement, les processus régissant la génération des écoulements sont encore mal connus. Ceci est dû en partie au fait que les réponses aux deux questions essentielles de l'hydrologie sont multiples. On peut finalement tenter de répondre - du moins partiellement - aux deux questions « **quel est le devenir de l'eau des pluies ?** » (Penmann, 1963) et « **quelle est la provenance de l'eau des rivières ?** » (Hewlett, 1961).

En s'inspirant de la classification de Ward et Robinson (1990), Musy et Higy (1998) distinguent quatre cheminements principaux que l'eau emprunte pour rejoindre la rivière.

- les précipitations directes à la surface de l'eau ("direct precipitation").
- les écoulements souterrains ("groundwater flow").
- les écoulements de surface ("overland flow").
- les écoulements de proche subsurface ("throughflow").

Cette classification n'est bien évidemment pas la seule possible. A vrai dire, aucune classification des processus ne fait l'unanimité auprès des hydrologues. Il existe une certaine confusion concernant les termes utilisés pour décrire les écoulements d'eau à l'intérieur des bassins versants, les définitions des sources d'écoulement proposées par Ward et Robinson (1990) seront retenues.

On peut encore décomposer l'écoulement de surface en :

1. Ecoulement (ruissellement) par dépassement de la capacité d'infiltration ou, ruissellement Hortonien ("Excess infiltration overland flow", "Horton overland flow")

2. Ecoulement par saturation ("Excess saturation overland flow") constitué par l'écoulement de surface des précipitations directes tombées sur les surfaces saturées.

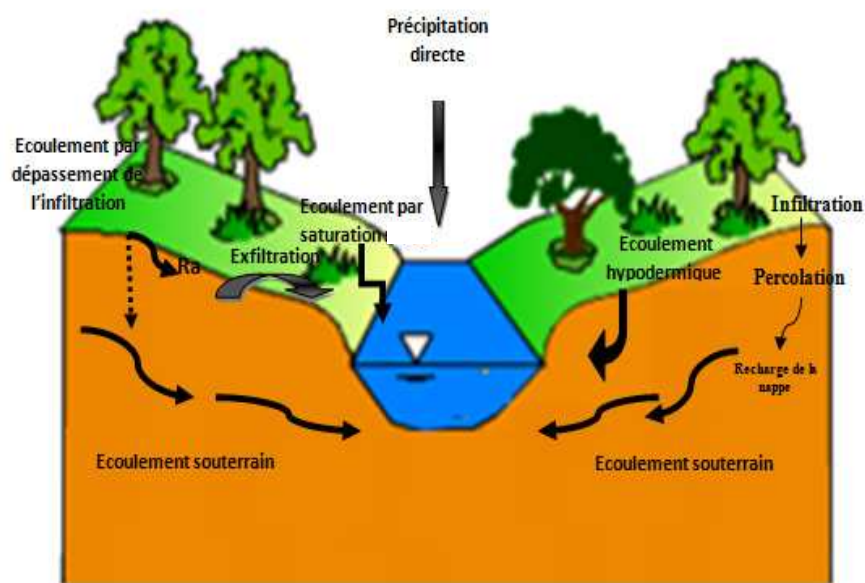
Quant à l'écoulement subsuperficiel, on peut distinguer quatre processus principaux :

- 1-Effet piston ("Translatory flow"),
- 2-Ecoulement par macropores ("Macropores flow"),
- 3-Intumescence de la nappe ("Groundwater ridging"),
- 4- Ecoulement de retour ("Return flow").

A cet ensemble de processus peut encore s'ajouter un cinquième élément qui est le ruissellement du à la fonte des neiges ("Snowmelt runoff").

On peut alors souligner quelques points essentiels :

Les éléments les plus importants dans la génération des crues sont les écoulements de surface et de subsurface, les deux premiers processus évoqués ci-dessus n'entrant que pour une faible part dans la crue.



**Figure 3.** Principaux processus d'écoulement



### **1.4.1. Précipitations directes à la surface de l'eau**

Est l'un des plus importants processus de génération de crue et c'est la fraction des pluies qui précipitent directement sur le réseau hydrographique. La contribution de cette composante est relativement limitée étant donné que le réseau hydrographique, à l'exception des lacs, recouvre une très faible partie des bassins versants.

L'importance des précipitations directes croît toutefois suite à des précipitations de longues durées ou avec le développement du réseau hydrologique qui présente alors d'importantes zones lacustres ou marécageuses.

### **1.4.2. Les écoulements de surface**

#### **1.4.2.1. Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration**

Le ruissellement Hortonien apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante.

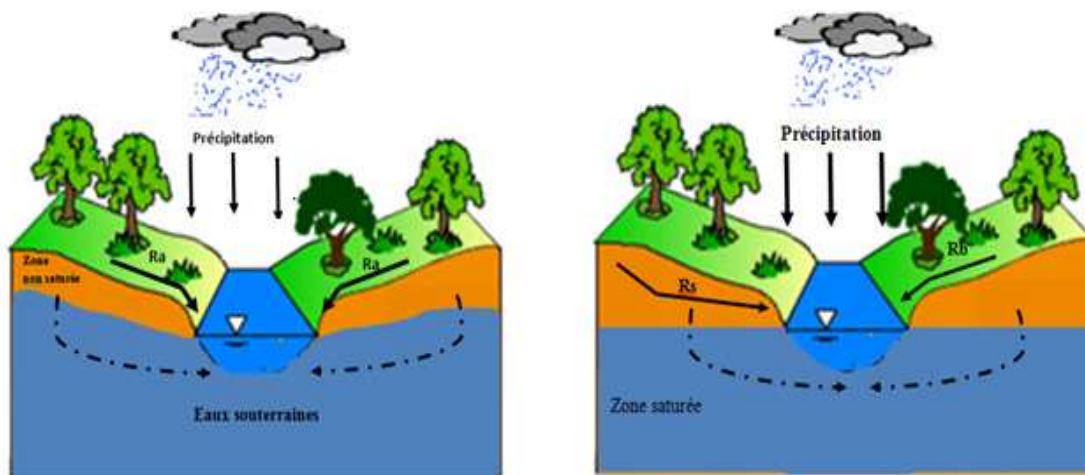
Différentes méthodes ont été proposées pour estimer la capacité d'infiltration et son évolution au cours d'une averse : équations empiriques ou à base physique. Cependant, en climat humide, ce ruissellement est le plus souvent actif sur des zones limitées du bassin et non généralisé à tout le bassin comme ont pu le laisser supposer les premières études utilisant ce concept pour expliquer la genèse des crues (Ambroise, 1998). Dans les zones recouvertes de végétation, le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration est marginal.

En effet, la capacité d'infiltration des sols sous couvert végétal est, en règle générale, très élevée. Toutefois, ce type d'écoulement de surface peut être important dans des cas particuliers tels que les sols saturés, les sols très secs (hydrophobie), les sols détériorés par surexploitation agricole ou encore les sols gelés.

#### **1.4.2.2. Ecoulement sur sol saturé :**

Lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée et lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée se produit ce type d'écoulement ; il peut être observé aussi lorsqu'une nappe phréatique est présente à proximité de la surface du sol. Pendant la pluie, lorsque le niveau de la nappe atteint la surface du sol ; la capacité d'infiltration du sol est contrôlée par la vitesse des écoulements dans la nappe qui reste souvent très faible voire nulle,

suivant les caractéristiques de l'hydrogéologie locale. Le ruissellement ainsi engendré peut également être alimenté par des exfiltrations d'eau provenant de la nappe affleurante, « return flow ». La convergence des lignes de courant (concavité des lignes d'écoulement vers l'aval), les pentes faibles et les sols minces favorisent la saturation « par dessous ». Cette forme de saturation est à opposer à la saturation « par dessus », qui est quant à elle favorisée par la présence d'un horizon peu perméable à faible profondeur et de fortes précipitations. La figure 4 illustre ces deux processus d'écoulement sur un versant



(a) Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration  $R_a$

(b) Ecoulement par saturation  $R_b$

$P$  : précipitation ,  $R_s$  : écoulement de subsurface (interflow)

$q_s$  : ruissellement de surface (par dépassement de la capacité d'infiltration)

$R_b$  : écoulement par saturation (précipitations directes sur surfaces saturées).

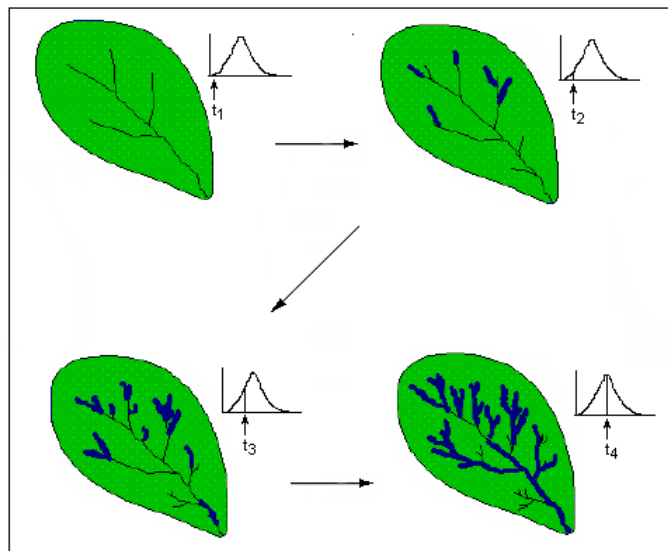
**Figure 4.** Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (a) et écoulement par saturation (b)

#### ◆ Localisation des surfaces saturées

Le ruissellement sur surface saturée résulte de la dynamique de l'ensemble de la nappe affleurante. Il est fréquemment observé dans les zones situées en fond de vallées à proximité d'un cours d'eau. Étudiées initialement par Cappus (1960), puis par Betson (1964) et Dunne et Black (1970), les surfaces où se produisent ces écoulements sont alors appelées « aires contributives saturées », car le ruissellement participe directement à l'écoulement du cours d'eau. Leur évolution et leur connectivité dans le temps et dans l'espace ont depuis fait l'objet de nombreux travaux (Ambroise et al, 1996)

Les contrôles du sol et de la topographie sur l'écoulement latéral et implicitement sur le développement des surfaces saturées peuvent être identifiés à l'aide d'indices exclusivement topographiques. Ces indices sont principalement dépendants de l'hypothèse d'un état stationnaire (l'épaisseur du sol reste constante) et d'une connaissance incomplète de la variation spatiale des propriétés du sol. Les résultats obtenus par leur application à des mesures in situ sont sujets à controverse.

La figure 5 montre un bassin versant et son réseau hydrographique ainsi que l'extension successive des surfaces saturées au cours d'un événement de pluvieux (concept de "variable source area").



**Figure 5.** Extension du réseau hydrographique et des surfaces saturées durant une crue pour quatre (04) pas de temps (D'après Kirby, 1978)

### 1.4.3. Écoulement de subsurface (hypodermique)

Correspond à la somme des écoulements de proche subsurface et des écoulements souterrains, et apparaisse dans les couches peu profondes du sol et se caractérisent principalement par un mouvement latéral de l'eau suite au processus d'infiltration.

Les conditions essentielles pour voir apparaître des écoulements de subsurface et que la conductivité hydraulique latérale du milieu doit être nettement supérieur à la conductivité verticale. dans ce cas l'eau, s'écoule latéralement en zone non saturée par un mécanisme type

« toi de chaume » ou, dans le cas d'un écoulement en zone saturée, lorsque une nappe perchée se forme dans la partie supérieure d'un horizon peu perméable.

Des conditions particulièrement favorables existent là où une couche de sol, mince et perméable, couvre un substratum quasi imperméable. Il se peut aussi que plusieurs niveaux superposés d'écoulement de subsurface se forment. Ces niveaux correspondent à des changements de texture et /ou de structure dans le sol. Hewlett et Hibbert (1963) ont montré que l'écoulement de subsurface en régime non saturé était capable de devenir l'écoulement de base dans des terrains de forte pente ; une frange saturée réduite au pied du versant étant continuellement alimentée par les écoulements non-saturés

Le terme d'écoulement de proche subsurface est utilisé pour décrire les eaux qui s'infiltrent et se déplacent latéralement dans les horizons supérieurs du sol en direction de la rivière. Ces écoulements se produisent au-dessus de la nappe permanente soit à travers la zone non saturée soit à travers une nappe perchée. Les écoulements de proche subsurface sont actifs essentiellement dans les sols où la conductivité hydraulique latérale est nettement supérieure à la conductivité verticale. Cette situation est certainement la plus classique. En effet, mis à part les cas où les sols sont détériorés (compaction), la conductivité hydraulique décroît en général avec la profondeur. La macroporosité du sol favorise également les écoulements de proche subsurface. Ce type d'écoulement est actif essentiellement lorsque le sol est proche de la saturation.

D'une façon générale, exception faite des zones à forte pente où les écoulements de proche subsurface dominent, la majorité des pluies s'infiltré dans le sol, percole et rejoint la nappe profonde. Une partie de cette eau rejoint alors la rivière par des écoulements souterrains à travers la zone saturée. Etant donné que l'eau circule très lentement à travers le sol, l'alimentation de la rivière par les écoulements souterrains est retardée de plusieurs jours, mois voire même de plusieurs années par rapport aux pluies.

#### **1.4.4. Ecoulement par effet piston**

Certains auteurs après l'analyse du processus des écoulements de subsurface visant à expliquer la forte proportion d'eau ancienne dans l'hydrogramme de crue, ont supposé une hypothèse d'existence d'un mécanisme de transmission quasi instantanée d'une onde de pression. Ce mécanisme, nommé "*effet piston*", suppose que le versant reçoit 'une impulsion' d'eau transmise à l'aide d'une onde de pression vers l'aval, provoquant une exfiltration immédiate en bas de versant. Ce phénomène peut être exécuté expérimentalement avec une colonne de sol saturée sur laquelle on applique une charge d'eau. L'eau se déplace sous l'effet

de la gravité en chassant celle qui se trouve à l'autre extrémité de la colonne. Dans ce type d'explication, il faut alors distinguer la vitesse "fictive" de l'eau dans le sol qui est relativement lente et qui détermine le temps moyen de transit de l'eau sur le versant de la vitesse de propagation de l'onde de pression qui peut exprimer la vitesse de réaction du bassin versant.

Malgré la simplicité de cette explication, "l'effet piston" est limité par le fait qu'une impulsion d'une certaine quantité d'eau ne s'accompagne d'une exfiltration équivalente (ou presque) que dans les cas où le sol présente une capacité de stockage très faible.

#### **1.4.5. Ecoulement par macropores**

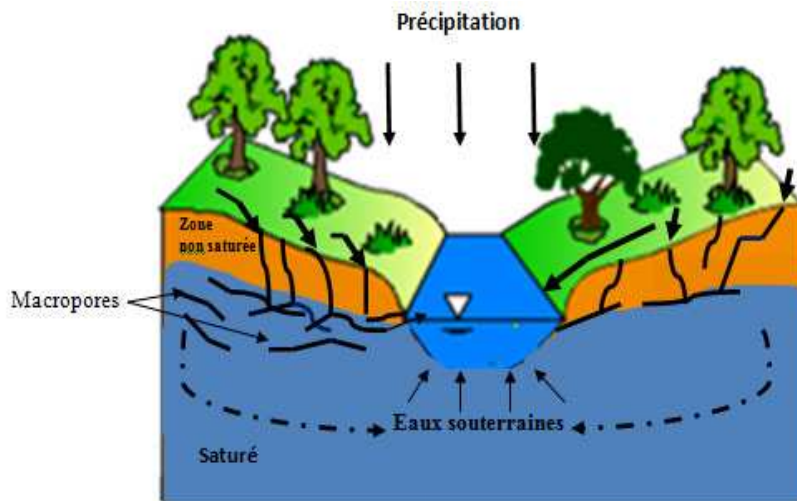
Avant d'analyser ce type d'écoulement subsurfacique, on doit définir un macropore. Musy (1998) en citant Corey (1977) définit un macropore comme un pore pour le quel les phénomènes de capillarité sont inexistantes ;

La définition du macropore dépend d'une part d'arbitraire quant au choix d'une taille effective ainsi que de l'expérience pratique que l'on a sur le terrain. D'autre part, l'analogie du comportement de l'eau dans le sol avec celui d'un ensemble de capillaires devient discutable dès lors que la porosité augmente (figure 6). Les macropores et les mésopores sont liés à la structure du sol et à son activité biologique et présentent une forte hétérogénéité spatiale.

On peut distinguer plusieurs origines à la macroporosité :

- Pores formés par la faune du sol
- Pores formés par la végétation
- Macropores naturels
- Fissures

D'une manière générale, la détermination expérimentale de la macroporosité doit distinguer les macropores actifs sur le plan des écoulements (ce sont les macropores connectés) de ceux qui ne le sont pas. On peut ainsi recourir à des traceurs chimiques qui permettent de mettre en évidence les cheminements préférentiels de l'eau.



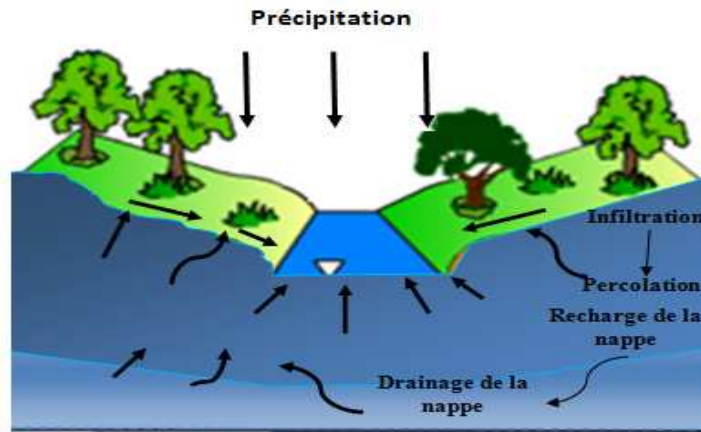
**Figure 6.** Ecoulement par macropores

On admet en règle générale que l'hydrogramme de crue est souvent contrôlé par les écoulements de subsurface. Si ces écoulements transitent principalement par la présence de macropores, la transmission de l'eau peut se faire à des vitesses du même ordre de grandeur que celles obtenues pour l'écoulement de surface.

L'écoulement par macroporosité a vu son intérêt grandir auprès des hydrologues depuis une quinzaine d'années. On lui attribue principalement le rôle d'accélérer la recharge de la nappe tout en favorisant le déclenchement de l'effet piston par l'accroissement des vitesses de percolation.

#### **1.4.6. Ecoulement par intumescence de nappes**

Ce phénomène a été proposé par Sklash et Farvolden (1979) pour tenter d'expliquer la contribution des eaux souterraines aux débits de crue, son origine est le soulèvement rapide de la nappe en bas de versant lors d'équilibre entre nappe – cours d'eau qui réagit rapidement lors des pluies dans les zones où elle est peu profonde (quelques mètres de part et d'autre d'un cours d'eau). Il entraîne alors une augmentation rapide du gradient de charge hydraulique de la nappe durant la crue. De plus, ce processus est fortement lié à la présence d'une frange capillaire proche de la surface, ce qui entraîne que le profil de sol est proche de la saturation. En conséquence, seule une faible quantité d'eau suffit à déclencher ce type de processus (figure 7).



**Figure 7.** Illustration du phénomène d'intumescence de la nappe.

#### 1.4.7. Ecoulement de retour

Dans le cas d'existence d'une fringe capillaire ou nappe proche de la surface du sol, une faible quantité d'eau sature le sol. Si la transmission latérale des eaux subsurfaciques diminue, ces dernières remontent à la surface, on retrouve alors dans l'écoulement de surface de l'eau antérieure à l'eau de pluie. La répartition spatiale des zones propices aux écoulements de retour est donc liée à la topographie du bassin versant (Figure 8).



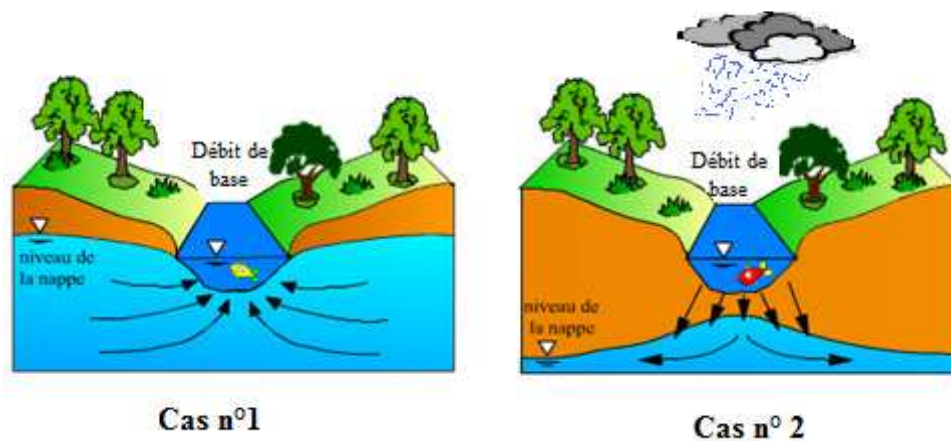
**Figure 8.** Ecoulement de retour (d'après de Musy, 1998)

#### 1.4.8. Ecoulement souterrain

Leur rôle est loin d'être négligeable dans la constitution des volumes de crue. L'utilisation de traceurs hydrologiques a permis de mettre en évidence leur importance lors de certaines crues

remettant en question une idée classiquement admise selon laquelle les eaux d'une crue étaient liées à la pluie nouvelle. Les écoulements souterrains sont en général très réguliers, ce qui est caractéristique de la lente vidange de l'eau stockée dans le sol et dans la roche.

**L'écoulement souterrain en milieu saturé :** une partie de l'eau qui rejoint la nappe après percolation, va transiter à travers l'aquifère avec une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau souvent par le biais d'un phénomène de résurgence de la nappe. L'écoulement de base assure ainsi le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiage (cas 1) (voir figure 9). Il arrive que dans certaines situations, le toit de la nappe étant plus bas que le fond de la rivière, le cours d'eau alimente la nappe (cas 2) (voir figure 9).



**Figure 9.** L'écoulement souterrain en milieu saturé (d'après Musy, 2004)

#### 1.4.9. Ecoulement dû à la fonte des neiges

L'écoulement par fonte de neige ou de glace domine en règle générale l'hydrologie des régions de montagne ainsi que celles des glaciers ou celles des climats tempérés froids.

Le processus de fonte des neiges provoque la remontée des nappes ainsi que la saturation du sol. Selon les cas, il peut contribuer de manière significative à l'écoulement des eaux de surface. Une crue provoquée par la fonte des neiges dépendra : de l'équivalent en eau de la couverture neigeuse ; du taux et du régime de fonte et finalement des caractéristiques de la neige.



## **1.5. Interactions des processus d'écoulement**

La genèse du ruissellement, qui correspond ici à la formation d'un excès d'eau en surface résultent donc de la combinaison de deux phénomènes : l'écoulement de base et l'écoulement de crue.

**1.5.1. L'écoulement direct** qui constitue la majorité des crues, est composé des précipitations directes, du ruissellement de surface et de l'écoulement rapide de proche subsurface.

**1.5.2. Le débit de base** peut être défini comme l'écoulement soutenu, prolongé. Il est composé de l'écoulement souterrain et du débit retardé de proche subsurface.

La complexité des processus de genèse des crues se caractérise par une importante interaction et une variabilité spatio-temporelle. L'état de saturation initiale des sols constitue également un facteur hydrologique fondamental dans la quantité des volumes de crues générés.

## **1.6. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de définir et de comprendre les différents processus hydrologiques intervenant dans le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant : à savoir les précipitations sous ces diverses formes, l'évaporation des eaux superficielles, l'évapotranspiration et l'interception des végétations, l'infiltration d'eau dans le sol et son emmagasinement et les écoulements.

Vue l'importance des écoulements dans le cycle de l'eau nous avons analysé tous les chemins possibles de l'eau à travers le sol.

## **Chapitre 2. Le Ruissellement**

### **2.1. Introduction**

Divers travaux sur les principaux processus contrôlant le chemin de l'eau dans le bassin versant avaient pour objectif premier une meilleure connaissance de la genèse des crues. L'historique des hypothèses émises à travers ce type d'approche est largement décrit dans la bibliographie (Ambroise, 1998; Ogden and Watts, 2000) L'objectif de ce chapitre est de présenter les aspects à la fois généraux et modernes des théories relatives aux mécanismes de génération de l'écoulement depuis les idées de Horton (1933) - novatrices à l'époque, jusqu'à celles de ce jour, basées sur l'idée de cheminements préférentiels. On se gardera toutefois d'affirmer que la recherche en ce domaine est achevée car le fonctionnement hydrologique, malgré l'importance des apports de ces dernières années, reste encore bien mal compris. Le développement de nouvelles théories a même donné lieu à toute une série de problèmes et soulevé de nouveaux questionnements.

### **2.2. Définition**

On utilise le terme d'écoulement superficiel ou ruissellement pour décrire la circulation de l'eau en surface dans le réseau hydrographique et le terme d'écoulement rapide de crue pour désigner le volume d'écoulement résultant d'un événement pluvieux.

D'autres définitions

- ❖ Le ruissellement est la quantité d'eau qui, au cours d'une précipitation, échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration (Castany, 1967).
- ❖ le ruissellement constitue la part de la pluie qui n'est pas absorbée par le sol et qui se s'accumule pas à la surface mais qui s'écoule dans le sens de la pente et qui se concentre en rigoles et torrents (Lambert, 1996).
- ❖ Fraction de l'eau de pluie, de la neige fondue ou de l'eau d'irrigation qui s'écoule à la surface du sol et retourne tôt ou tard dans un cours d'eau. Le ruissellement peut recueillir les polluants atmosphériques ou terrestres et les transporter jusqu'aux eaux réceptrices. (Glossaire d'hydrologie)

### 2.3. Les formes de ruissellement

On distingue deux types de ruissellement : le ruissellement par refus d'infiltration d'un sol non saturé et le ruissellement par refus d'infiltration d'un sol saturé. La quantité d'eau qui ruisselle dépend, d'une part, de la perméabilité des sols, d'autre part de leur saturation en eau. Les sols mouillés laissent moins d'eau s'infiltrer que les sols secs.

Lors d'un orage tombant sur un bassin versant, l'agissement au niveau du cours d'eau (exutoire) se nomme **réponse hydrologique**

La réponse hydrologique peut être soit **rapide** quand elle est imputable aux écoulements de surface ou, par exemple, à un effet piston, ou encore à l'effet de la macroporosité du sol. Soit **retardée** lorsqu'elle est due principalement aux écoulements souterrains.

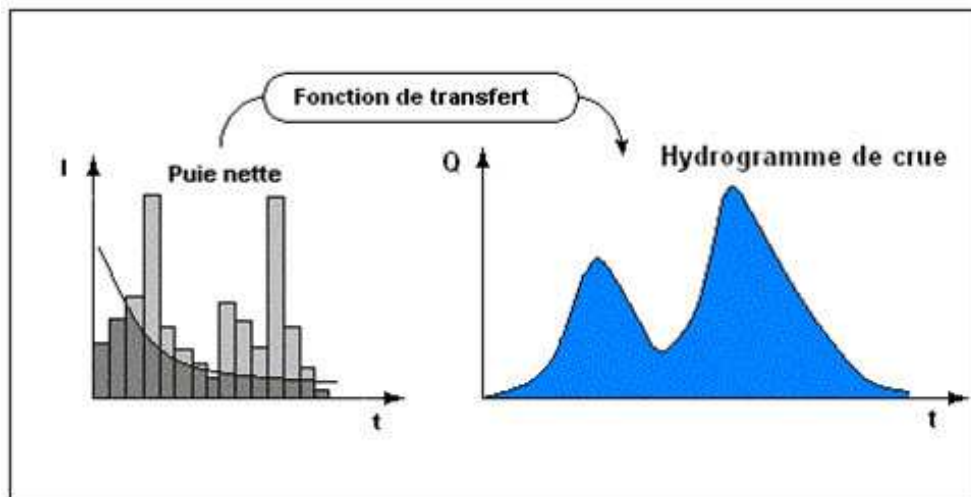
De plus, la réponse peut être différenciée selon que cette dernière est :

- **Totale** : Dans ce cas, la réponse hydrologique est composée à la fois par des écoulements de surface et souterrains.
- **Partielle** : c'est à dire lorsque la réponse est la résultante d'un ou l'autre de ces deux processus.

Tout ruissellement se traduit par un hydrogramme de crue par l'intermédiaire de deux fonctions. La première est nommée fonction de production (fonction d'infiltration) qui permet de déterminer l'hyétogramme (intensité en fonction du temps) de pluie nette à partir de la pluie brute.

La seconde est la fonction de transfert permet de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette (Figure 10). A rappeler que la pluie nette est la partie de l'averse qui a ruisselé.

Le passage du hyétogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré. Dès lors, on comprendra aisément que la détermination d'une relation analytique rigoureuse entre précipitations et débits est une tâche très difficile. Toutefois, l'analyse de séries de couples pluies-débits permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant



**Figure 10.** Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue.

## 2.4. Les facteurs de ruissellement

la forme d'hydrogramme est influencée par l'effets combiné de plusieurs facteurs soit des facteurs externes tels que ceux liés aux conditions climatiques du milieu (la pluviosité) et la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, orientation des versant), soit à des facteurs internes comme les propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale), la structure du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques) et l'état antécédent d'humidité du sol.

### 2.4.1. Facteurs externes

#### 2.4.1.1. Les facteurs climatiques

Ces facteurs qui influencent la forme de l'hydrogramme, agissent aussi sur le volume du ruissellement sont :

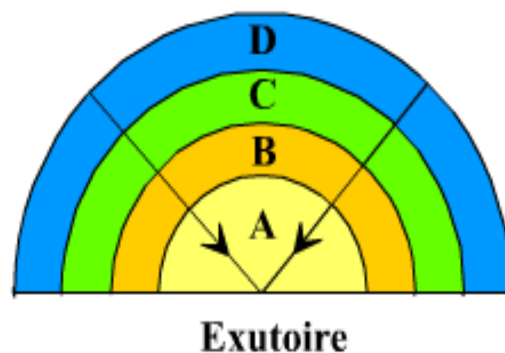
- ❖ l'intensité et la durée de la précipitation ;
- ❖ La distribution de la précipitation sur le bassin ;
- ❖ La direction du cheminement de l'averse ;
- ❖ Le genre de précipitation et d'orage.

#### 2.4.1.1.1. Influence de la durée et l'intensité de la pluviométrie :

Sur un bassin particulier le débit de pointe et la durée de ruissellement ainsi que la quantité d'écoulement dépendent du volume précipité, mais également des variations d'intensité et de la durée de l'averse.

Afin d'illustrer tout d'abord l'influence de la durée de l'averse, nous emprunterons le raisonnement suivant qui a été proposé par Linsley et Crowford en 1966 et repris en 1976 par Réménérias :

Soit un bassin versant divisé en quatre zones A-B-C-D concentriques d'égales surfaces, d'égales coefficients de ruissellement et délimitées par des lignes isochrones. Rappelons que les lignes isochrones sont des lignes d'isovaleurs de temps de concentration entre le point considéré et l'exutoire du versant. On assigne à chaque secteur un temps d'écoulement variant de 1 heure pour la zone la plus proche de l'exutoire (A) à 4 heures pour la zone la plus éloignée (D) (Figure 11).

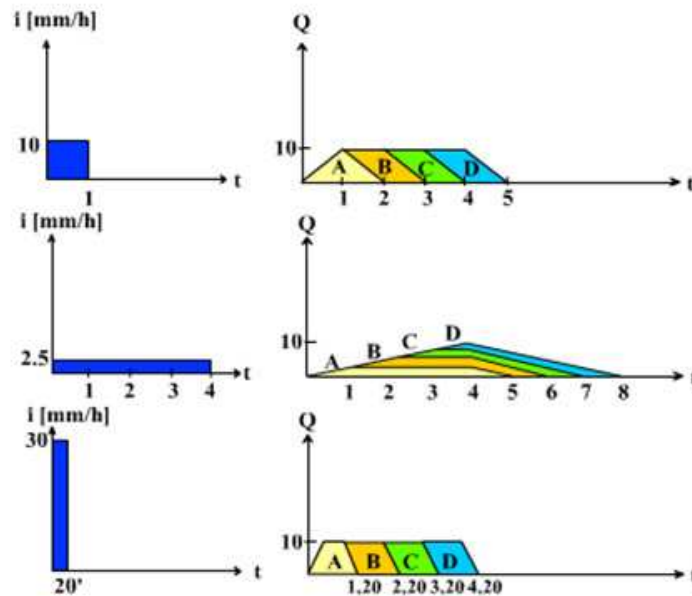


**Figure 11.** Représentation schématique du bassin versant (d'après Réménérias, 1976)

La figure (12) ci-dessous présente trois cas distincts de durée :

- Averse uniforme de 10 mm pendant une heure ( $i = 10 \text{ mm/h}$ ) sur l'ensemble du bassin.
- Averse uniforme de 10 mm pendant 4 heures ( $i = 2,5 \text{ mm/h}$ ) sur l'ensemble du bassin.
- Averse uniforme de 10 mm pendant 20 minutes ( $i = 30 \text{ mm/h}$ ) sur l'ensemble du bassin.

On peut alors observer qu'il existe une durée critique de la précipitation pour la quelle le débit de pointe est maximal. Cette durée critique est égale à la durée de concentration du bassin versant.



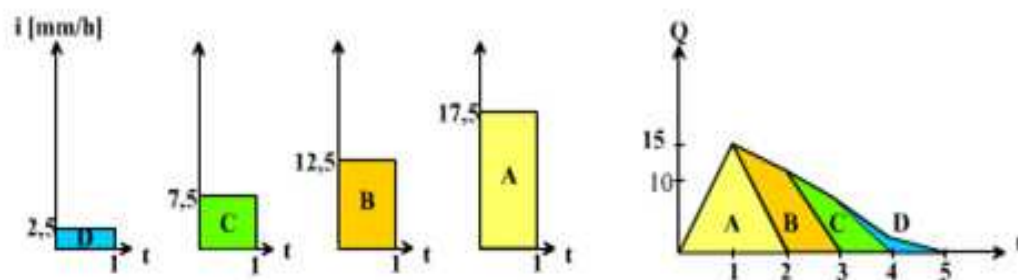
**Figure 12.** Influence de la durée de l'averse sur la réponse hydrologique d'un bassin versant (d'après Réménérias, 1976. Les hyétoigrammes figurent sur la partie gauche de la figure tandis que les hydrogrammes résultants figurent à droite)

#### 2.4.1.1.2. Influence de la distribution spatiale

A travers les exemples suivant nous essayerons de démontrer la modification introduite par la distribution spatiale de la précipitation sur la forme de l'hydrogramme :

**Exemple 1** :d'après (Gray et Wigham, 1972): si une zone de précipitation intense se trouve à une proximité de l'exutoire du bassin, on aura un hydrogramme avec une montée rapide, un maximum pointu, et une pente abrupte de la courbe de décrue .si une plus grande quantité d'eau tombe sur la partie supérieures du bassin, l'hydrogramme présentera un maximum élevé et plus étendu.

**Exemple 2** :D'après (Réménérias, 1976): La précipitation totale moyenne de 10 mm en 1 heure est inégalement répartie sur l'ensemble du bassin. La figure (13) illustre l'influence de la distribution spatiale de l'averse sur l'allure de l'hydrogramme résultant.



**Figure 13.** Influence de la distribution spatiale de l'averse sur la réponse hydrologique d'un bassin versant. Les hyétoigrammes figurent sur la partie gauche de la figure tandis que les hydrogrammes résultants figurent à droite. (D'après Réménérias, 1976).

**2.4.1.1.3. Direction de l'orage :** la direction de l'orage par rapport à l'orientation du réseau de drainage du bassin influence à la fois la grandeur du débit de pointe et la durée du ruissellement.

**2.4.1.1.4. Type d'orage :** le type d'orage est important en ce sens que les orages électriques entraînent des débits de pointe élevés sur les petits bassins, alors que les tempêtes cycloniques ou frontales ont une influence sur la crue des grands bassins.

#### **2.4.1.2. Forme et dimension du bassin versant :**

La forme du bassin versant présente une caractéristique significative influençant la période de montée du débit de crue : par exemple l'hydrogramme d'un bassin semi-circulaire, dont l'écoulement converge de tous les points vers la sortie, atteindra le maximum plus rapidement qu'un hydrogramme de même dimension mais long et étroit.

Langbein et al, 1947 ont résumé ces effets de la façon suivante :

« Un bassin versant dans lequel les tributaires sont répartis sur un espace assez restreint pour que les trajets de l'eau à partir de tous les points du bassin soit relativement courts va déverser son eau plus rapidement et atteindre des débits de pointe supérieurs à ceux d'un bassin dont la majorité des points sont éloignés de l'exutoire ».

L'effet principal de l'augmentation de la dimension du bassin versant sur la géométrie de l'hydrogramme de ruissellement consiste à dilater l'échelle temps de l'hydrogramme (Wisler

et Brater, 1959). ainsi que le débit de pointe durant un orage, diminue proportionnellement avec la superficie du bassin versant.

## **2.4.2. Facteurs internes**

**2.4.2.1. Les facteurs topographiques :** la réponse hydrologique du bassin versant et fortement liés à la modification du transport et du stockage du volume excédentaire de précipitation. Nombreux sont les facteurs impliqués et quelques uns affectent considérablement le phénomène alors que d'autres n'ont que des conséquences infimes.

Sherman(1932) est d'avis que les facteurs dominants sont : la distribution des cours d'eau, la pente du terrain qui limite les vallées ou la pente générale du bassin, la pente du cours d'eau et le stockage résultant des obstructions sur le terrain ou dans les cours d'eau, les quelles forment des réservoirs naturelles de détention d'eau.

### **2.4.2.2. Distribution des cours d'eau :**

L'extension et la disposition de la chevelure du réseau hydrographique affecte le rendement du système de drainage, ainsi le temps mis par l'eau pour y parvenir à l'exutoire est influencé par la longueur du cours d'eau. De même que dans un système bien défini, la distance de ruissellement est réduite, ainsi la diminution correspondante du temps d'écoulement produit un hydrogramme d'écoulement dont le temps de concentration est court et prononcé.

### **2.4.2.3. La pente :**

#### **2.4.2.3.1. Pente du cours d'eau principal**

La pente du cours d'eau influence la distribution temporelle de l'hydrogramme et favorise la vitesse de l'écoulement. La courbe de décrue est influencée passablement par la pente car la pente de la courbe de décrue augmente avec la pente du cours d'eau, alors que le temps de base de l'hydrogramme diminue.

#### **2. 4.2.3.2. Pente générales du bassin**

La pente générale du bassin est reliée de façon complexe au phénomène du ruissellement étant donné son influence sur l'infiltration, la teneur du sol en eau et le couvert végétal l'effet



de la pente du terrain sur la forme de l'hydrogramme dépend de l'intensité pluviométrique et affecte le temps de concentration des volumes d'écoulement en égard des cours d'eau définis.

Sur les grands bassins, le temps de ruissellement est faible comparativement au temps d'écoulement dans les cours d'eau. Réciproquement, dans les petits bassins, le régime de ruissellement produit un effet marqué sur les relations temporelles sur la pointe de l'hydrogramme (commons, 1942).

Sherman (1932) résume l'effet des variations de la topographie sur l'hydrogramme unitaire de la façon suivante :

« Une région à pente raide possède peu de zones de stockage et donne un hydrogramme unitaire dont le maximum est élevé et accentué et dont le temps de base est court. Un terrain plat, possède de grandes surfaces arrondi et dont le temps de base est plus long ».

#### **2.4.2.4. Nature et géologie du sol :**

La géologie et la nature du sol sont influencent fortement la réponse hydrologique, car elles affectent l'écoulement souterrain et l'écoulement hypodermique qui composant l'hydrogramme de crue. on peut observer de grandes ou de faibles contributions de l'écoulement souterrain à une rivière selon la nature des formations géologiques du profil hydrique. il est aussi possible que la nappe phréatique soit à un niveau tel que la rivière alimente continuellement en eau (cours d'eau affluent) les aquifères souterrains.

Le cours d'eau peut être ou bien drainant et être alimenté continuellement par l'écoulement souterrain, ou bien affluent et alimentant alors les nappes aquifère .un cours d'eau peut aussi être affluent en période de crue et drainant en période d'étiage.

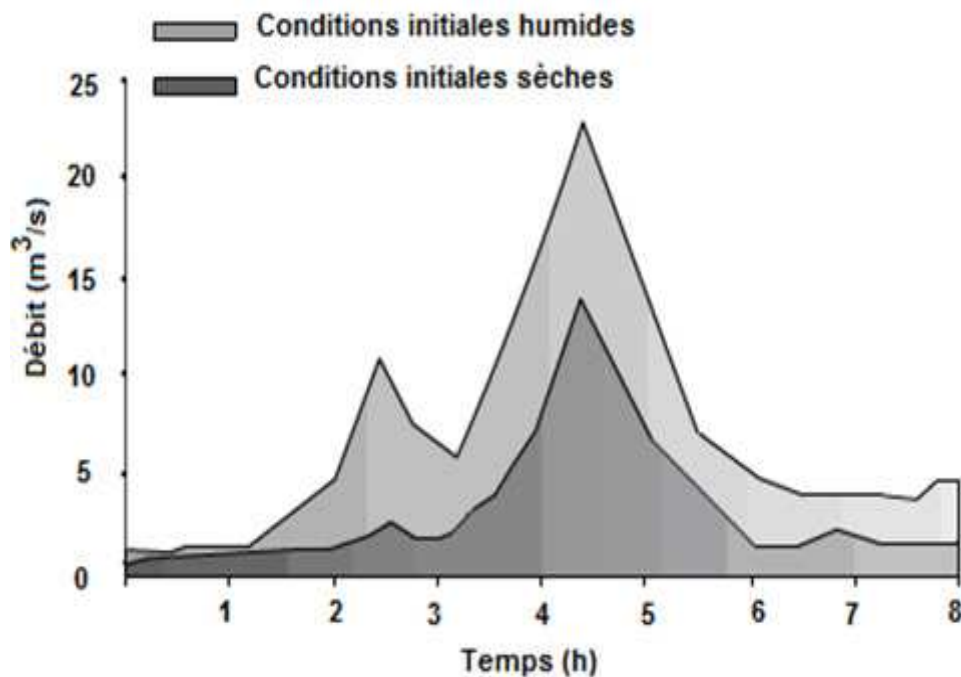
#### **2.4.2.5. Stockage ou emmagasinement**

puisque la zone d'emmagasinement doit d'abord être remplie, puis vidée, l'effet de retardement et de modification que possède la zone de stockage sur les volumes de précipitation excédentaire contribue à définir la forme de l'hydrogramme. il y a atténuation de la majeure partie des variations causées par les différences de distribution d'intensité et de répartition d'une pluie sur les sous-bassin et par les différences de temps d'écoulement des volumes de ruissellement ,des sous bassin vers l'exutoire.

#### 2.4.2.6. Importance des conditions antécédentes d'humidité

La réponse hydrologique dépend également fortement de l'état hydrique initial du bassin, lui-même relié aux séquences de divers types de périodes pluvieuses et sèches qui ont précédé l'événement pluie-débit étudié. Ainsi, une pluie tombant sur un sol sec servira d'abord à combler le déficit d'humidité du sol. Cette même pluie sera entièrement disponible pour le ruissellement si le sol est déjà saturé au début de l'événement.

Dans un état initial sec (nappe profonde, faible extension des surfaces saturées), la recharge de la nappe sera beaucoup plus lente et le ruissellement par saturation beaucoup plus limité. La (figure 14) donne un exemple de débit simulé pour deux conditions antécédentes particulières à savoir une condition humide et une condition sèche. La condition initiale sèche se traduit par une première crue bien plus faible que dans la situation d'une condition initiale humide puisque l'eau de pluie va commencer par remplir le réservoir sol avant de générer de l'écoulement.



**Figure 14.** Influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant (sol initialement humide en noir et sol initialement sec en gris).

## 2.5. L'hydrogramme de crue

### 2.5.1. Définition

L'hydrogramme d'une crue se définit comme la variation temporelle du débit du cours d'eau après une sollicitation du bassin versant correspondant.

### 2.5.2. Composantes de l'hydrogramme de crue

La forme de l'hydrogramme résultant d'un évènement pluvieux de courte durée sur un bassin versant, suit un modèle générale qui se présente sous forme d'une courbe en cloche dissymétrique .ce modèle se divise en trois parties principales ,une partie correspondant à la montée, ou d'accroissement du débit qui atteint un maximum ou une crête selon l'importance de l'écoulement souterrain et une partie afférente à la diminution progressive est désigné sou le nom de courbe de décrue (figure 15 ).

Généralement, sur les petits bassins versants la participation du ruissellement de surface à l'hydrogramme de crue est beaucoup plus importante que la contribution de la précipitation dans les cours d'eau et les écoulements souterrain et hypodermique.

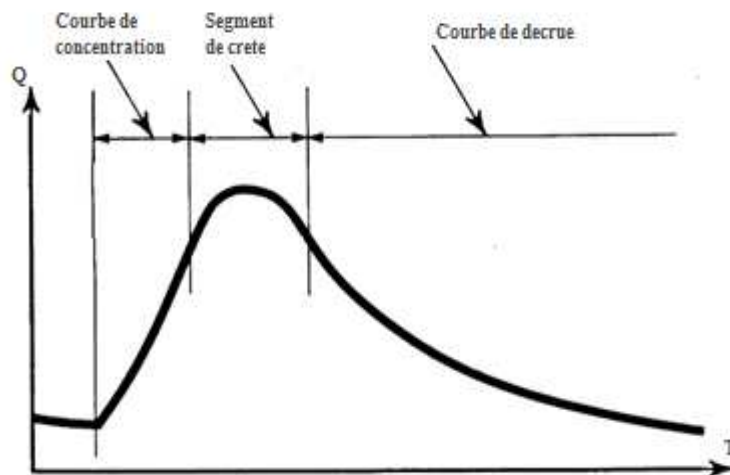


Figure 15. Composantes de l'hydrogramme de crue

#### 2.5.2.1. Parties ascendantes de l'hydrogramme ou courbe de concentration

Cette courbe s'étend du point où débute le ruissellement jusqu'au premier point d'inflexion de l'hydrogramme. Elle indique l'accroissement du débit causé par une augmentation de

l'emménagement ou de la détention à la surface dans le bassin versant Appelé aussi courbe de crue .l'allure de la courbe de concentration dépend :

- ✓ De la durée et de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la pluie.
- ✓ Un accroissement de superficie entre des isochrones adjacents situés entre les sections centrales et supérieures du bassin (influence de la pente) : ceci tend à accuser la concavité, tournée vers le haut de la courbe de concentration. Le débit croit d'abord lentement au cours des premières phases du ruissellement et plus rapidement ensuite jusqu'à la fin de la montée des eaux.
- ✓ Des conditions initiales du bassin (déficit en humidité du sol et état de la couverture végétale) ; la tendance à l'accélération du taux de croissance des débits en fin de montée, est accrue par le fait que la proportion d'eaux météoriques soustraite à l'écoulement par interception, infiltration et rétention en surface est plus importante dans les premières phases de l'averse. Ainsi des précipitations d'intensité constante entraînent des taux d'écoulement  $\frac{dQ}{dt}$  régulièrement croissantes.

#### **2.5.2.2. Segment de crête**

On désigne sous le nom de « Le segment de crête » la région comprise entre le point d'inflexion de la courbe de concentration et le point d'inflexion de la courbe de décrue. La pointe de l'hydrogramme ou débit instantané maximum, se produit pendant cette période de temps. Le maximum indique le temps d'arrivée de l'écoulement provenant de cette partie du bassin qui reçoit la plus grande concentration de pouces de ruissellement (aire-pouce). Il est extrêmement rare que l'hydrogramme d'un cours d'eau naturel présente un palier très marqué. Ramser, 1927) a décrit le maximum ainsi :

« Quelque soit la superficie du bassin versant, le taux maximum de ruissellement, correspondant à une pluie d'intensité donnée, se produit lorsque tous les points du bassin contribuent à l'écoulement .le point le plus éloigné du bassin versant atteint l'exutoire. En d'autres mots, la durée de la pluie doit être égale ou supérieur, au temps de concentration.il est prudent de rappeler que ce concept se limite aux petits bassins versants. »

#### **2.5.2.3. Courbe de décrue de l'hydrogramme**

La courbe de décrue complète l'hydrogramme .elle peut ou non tendre vers un débit nul selon les quantités de l'écoulement de base ou de l'écoulement souterrain .elle traduit, en effet, l'écoulement de l'eau accumulée dans le bassin après la cessation de tout apport d'eau de

pluie. On peut donc considérer que cette partie de l'hydrogramme décrit la diminution naturelle du débit, produite par le drainage de surface.

### 2.5.3. Les caractéristiques d'un hydrogramme

La forme de la courbe est quasi indépendante des variations de la précipitation et de l'infiltration avec le temps ; elle est essentiellement reliée aux caractéristiques physiques du cours d'eau et du volume d'eau « retenu » sur le bassin.

Les paramètres caractéristiques de l'hydrogramme sont :

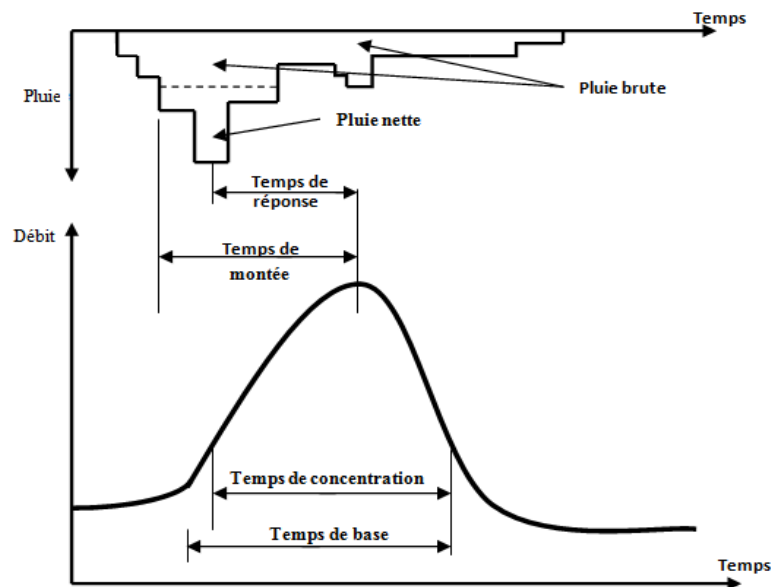
#### 2.5.3.1. Les pluies caractéristiques

- **Pluie efficace** : C'est la partie de l'averse ayant donné lieu à du ruissellement, autrement dit c'est la pluie qui n'a pas été totalement infiltrée, évaporée ou interceptée.
- **Pluie utile** : La pluie efficace est en général difficile à définir a priori. On lui substitue alors la notion de pluie utile qui désigne la partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement. Sa détermination est une question d'appréciation de l'hydrologue.
- **Pluie excédentaire ou pluie nette** : c'est la fraction de pluie brute participant totalement à l'écoulement.

#### 2.5.3.2. Les temps caractéristiques

- **Temps de réponse du bassin  $t_p$**  (ou "lag") : Représente en quelque sorte le déphasage dans le temps (le retard) entre la courbe chronologique des débits à son exutoire et celle des débits de la pluie.
- **Temps de concentration  $t_c$**  : C'est le temps mis par une goutte d'eau tombée sur le point le plus éloigné (hydrologiquement) de l'exutoire pour y parvenir. On peut estimer  $t_c$  en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct (i.e. fin de l'écoulement de surface).
- **Temps de montée  $t_m$**  : Temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide (décelable par le limnigraphe) et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

- **Temps de base  $t_b$**  : Durée du ruissellement direct, c'est-à-dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.



**Figure 16.** Les caractéristiques de l'hydrogramme

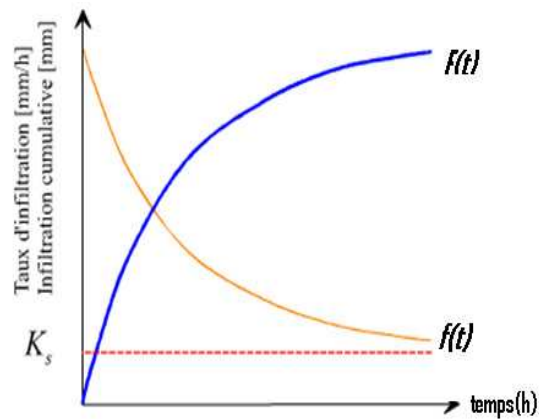
## 2.6. L'infiltration

### 2.6.1. Définition

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre dans le sol sous l'action de la gravité. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

- ◆ **Le régime d'infiltration  $f(t)$**  : nommé aussi « taux d'infiltration » se définit comme le flux d'eau pénétrant en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie) mais également des propriétés du sol (voir figure 17).
- ◆ **L'infiltration cumulative, notée  $F(t)$**  : c'est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (voir (Figure 17)).

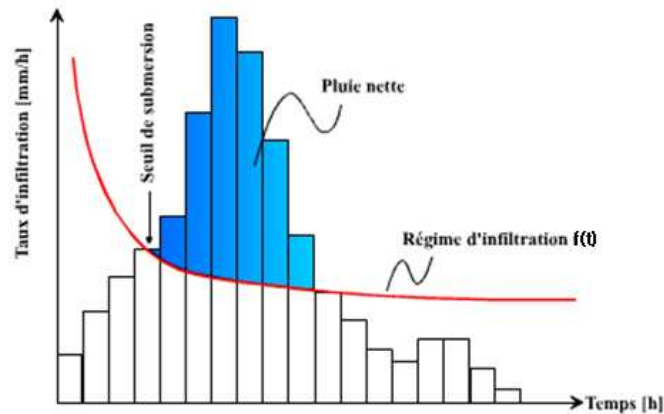
$$F(t) = \int_{t=0}^t f(t) dt$$



Avec : **F(t)** : infiltration cumulative au temps t(mm),  
**f(t)** : taux d'infiltration au temps t (mm/h)  
**Ks** : conductivité hydraulique à saturation

**Figure 17.** Evolution générale du régime d'infiltration et d'infiltration cumulative au cours du temps (d'après Musy, 2000)

- ◆ **La conductivité à saturation  $K_s$**  : c'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 ou infiltrabilité, représentée en (figure 18), représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers la surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, et également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.



**Figure 18.** Régime d'infiltration et capacité d'infiltration d'un sol  
(Tiré de Musy et Soutter, 1991).

## 2.6.2. Les types d'infiltration

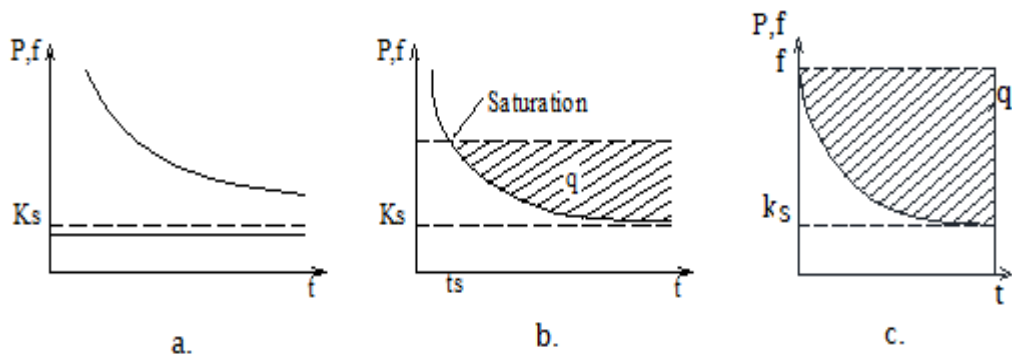
L'infiltration ou « écoulement vertical vers le bas » peut se diviser en trois (03) types :

**2.6.2.1. Infiltration à vitesse constante :** ce type se produit quand la pluie tombe à la surface du sol avec une intensité constante inférieure à la conductivité hydraulique de saturation. (Figure 19.a)

**2.6.2.2. Infiltration de l'eau de pluie détenue à la surface du sol :** ce cas est le plus fréquent; au début de l'averse, le taux d'infiltration est assez élevé, mais il décroît peu à peu quand la phase continue pour devenir inférieure à l'intensité de pluie. Il se produit alors une accumulation temporaire d'eau (rétention superficielle) à la surface du sol (Figure 19.b).

**2.6.2.3. Infiltration de l'eau accumulée dans les petites dépressions :** dans ce troisième type d'infiltration, on admet que la rétention superficielle dure pendant toute la période d'infiltration. C'est le cas, par exemple, lors des essais sur le terrain au moyen d'infiltromètres (Figure 19.c).





$t_s$  : temps de saturation

$q_s$  : ruissellement surfacique

S : rétention superficielle

**Figure 19.** Différentes possibilités d'infiltration

### 2.6.3. Les facteurs influençant l'infiltration

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs suivants :

- ◆ Le type du sol (structure, texture, porosité).
- ◆ La compaction de la surface du sol.
- ◆ La couverture du sol.
- ◆ La topographie et la morphologie.
- ◆ Le débit d'alimentation (intensité de la précipitation, débit d'irrigation).
- ◆ La teneur en eau initiale du sol.

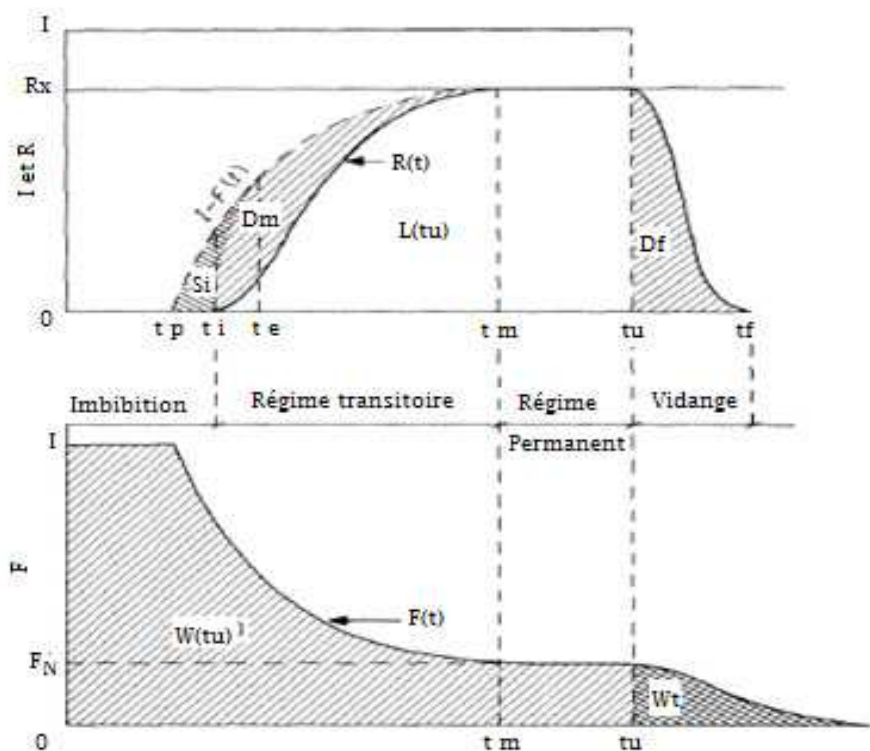
### 2.7. Relation ruissellement -infiltration

La relation entre la précipitation et le ruissellement qui en résulte, dépendent des différentes phases du phénomène. On distingue :

- ◆ **La phase d'imbibition** : Caractérisée par une infiltration qui peut être importante selon la nature des sols, le relief, le degré d'hygrométrie avant l'averse.

- ◆ **La phase transitoire** : caractérisée par le stock d'eau en place avant ruissellement, qui peut être important sur les terrains plats, avant d'obtenir la pression nécessaires au ruissellement.
- ◆ **La phase du régime permanent** : caractérisée par une intensité, un ruissellement et écoulement constants dans le temps .Autrement dit, elle se définit comme la hauteur moyenne d'eau ruisselée.
- ◆ **La phase de vidange** : Qui intervient à la fin de l'averse par un prolongement dans le temps des apports d'eau décroissants, et qui peut être déterminante selon la durée de l'averse, la superficie du bassin et de son relief. Plus le bassin est allongé et son relief faible, plus la phase de vidange sera longue.

La figure 20 : illustre les différentes phases



**Figure 20.** Ruissellement et infiltration sous intensité d'averse constante

(D'après Lafforgue, 1978).

## **2.8. Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons étudié exclusivement le processus hydrologique « ruissellement ». En premier temps, nous avons successivement vu les principaux facteurs qui conditionnent le comportement hydrologique d'un bassin versant, à savoir les facteurs externes : les facteurs climatiques, l'intensité pluviométrique, forme et dimension du bassin versant. La topographie, la distribution des cours d'eau, la pente, nature et géologie du sol, Stockage ou, et les conditions initiales d'humidité sont des facteurs internes influençant à leur tours le ruissellement. Par suite nous avons souligné les différentes caractéristiques d'hydrogramme de crue. Finalement, Vu l'importance de la relation ruissellement – infiltration, on s'intéresse à déterminer les différents aspects communs entre ces deux processus.

## **Chapitre 3. La Détermination Du Ruissellement**

### **3.1. Introduction**

Le caractère aléatoire du phénomène naturel engendrant les débits, c'est-à-dire la pluie, représente la plus grande contrainte d'évaluation du débit ruisselé. La résolution de ce problème est l'un des principaux buts des hydrologues et la notion de station de jaugeage, est le seul moyen en usage qui consiste à mesurer et à enregistrer sous une forme analogique ou numérique les variations du niveau de l'eau en un point d'une rivière.

Dans le cas où certaines difficultés s'imposent à la mesure du débit, des méthodes simples et robustes devraient être utilisées. Ce sont ces méthodes que nous allons présenter dans ce chapitre.

### **3.2. Les techniques de mesure du débit de ruissellement**

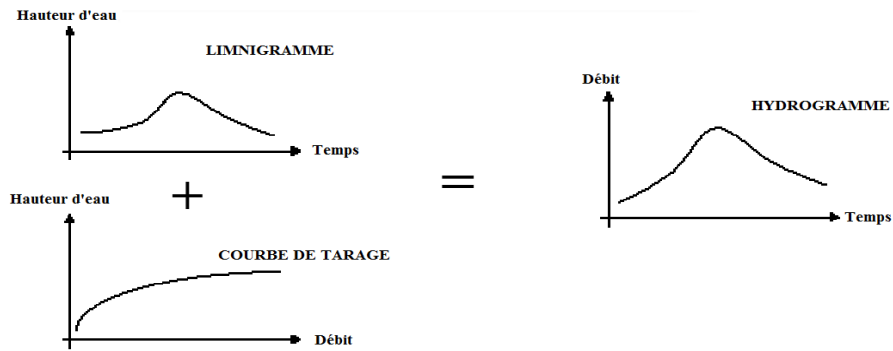
L'hydrométrie est une science dont l'objet est de déterminer les différents paramètres caractérisant les écoulements dans les cours d'eau naturelles ou artificiels, ces paramètres se résument en deux variables principales :

- ❖ Le niveau d'eau
- ❖ Le débit du cours d'eau

Dans ce qui suit nous détaillons les différentes étapes et méthodes de mesure de ces deux derniers paramètres.

#### **3.2.1. La mesure des hauteurs d'eau**

La limnimétrie est une science qui s'intéresse à la mesure de la hauteur d'eau (notée  $H$ ) exprimée en mètres au niveau d'une section donnée (station hydrométrique). On passe de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps  $H=f(t)$ , appelée limnigramme et mesurées par un limnigraphe, à celle des débits  $Q=f(t)$ , appelée hydrogramme par l'établissement d'une courbe de tarage  $Q = f(H)$  (Musy, 2002). La figure 21 résume cette transformation.



**Figure 21.** La production d'un hydrogramme. (Musy, 2002)

### 3.2.1.1. Instrument de mesure du niveau d'eau

#### 3.2.1.1.1. Limnimètres

La mesure la variation d'un plan d'eau concerne la limnimétrie et s'effectue de manière discontinue par la lecture d'une règle graduée (échelle limnimétrique) fixée sur un support par plusieurs types de limnimètres. Les plus utilisés sont les suivants :

- Echelle verticale graduée ;
- Rampe ou échelle inclinée ;
- Câble muni d'un poids installé sur une construction au dessus du cours d'eau ; et
- Perche ruban, fil ou pointe limnimétrique droite graduée pour mesurer la distance entre un repaire et la surface de l'eau.

#### 3.2.1.1.2. Limnigraphe

Le limnigraphe est un enregistreur graphique, utilisé pour connaître en continu les variations d'un plan d'eau dans la rivière en fonction du temps. Il existe plusieurs types et peuvent être classés à la fois selon leur mode de fonctionnement et selon leur mode d'enregistrement. Les plus utilisés sont les suivants :

- Le limnigraphe à flotteur ;
- Le limnigraphe à pression.

### 3.2.2. La mesure des débits

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour mesurer le flux d'eau traversant une section transversale d'un cours d'eau, canal, dérivation...etc, le choix de la méthode dépendant des conditions propres à chaque site.

### **3.2.2.1. Les méthodes complètes**

#### **3.2.2.1.1. Méthode du moulinet hydrométrique**

Un moulinet hydrométrique, à élément rotatif est un instrument de mesure de vitesse ponctuelle de l'écoulement dont le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale (Figure 22).

Les moulinets sont classés en deux types : le premier dont le rotor à axe vertical équipé d'aubes et l'autre muni d'un rotor à axe horizontal à hélice. Chaque composante du débit est mesurée de manière indépendante au cours de la même opération sur le terrain:

- La vitesse moyenne  $V$  est calculée à partir des vitesses ponctuelles mesurées avec des capteurs, qui sont généralement des moulinets hydrométriques ou des flotteurs lestés ;
- La largeur et les distances horizontales mesurées sur un câble tendu transversalement ou par des méthodes topographiques ;
- Les profondeurs mesurées avec perches graduées, des saumons de lestage ou avec des échosondeurs à ultrasons.

La relation résultante est de la forme :

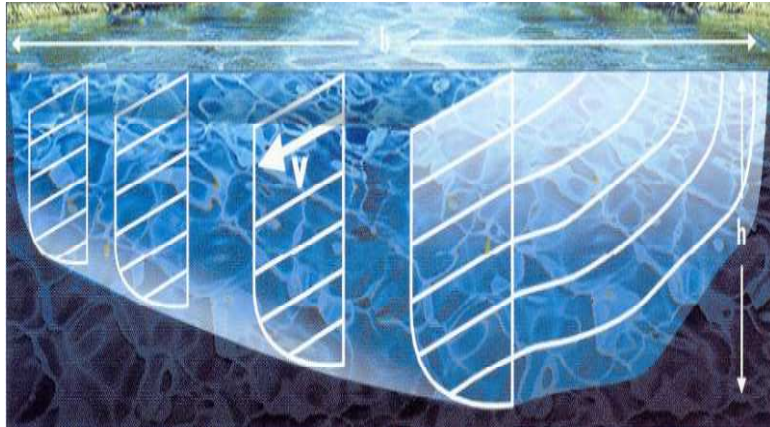
$$Q = V \times S \quad [2]$$

Ou :

$Q$  : Le débit [ $m^3.s^{-1}$ ] ;

$S$  : section mouillée d'écoulement [ $m^2$ ] et

$V$  : la vitesse moyenne perpendiculaire [ $m.s^{-1}$ ].



**Figure 22.** Schéma de la section transversale d'un cours d'eau (Unité Observatoire Hydrologiques et Ingénierie (OBHI) IRD, 2007)

### 3.2.2.1.2. Méthode du profileur de courant

Le profileur de courant ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), fixés sur un coté de l'écoulement émettent un signal ultrasonique dans le flux du liquide. Les particules transportées par le courant réfléchissent les ultrasons par les particules solides ou les bulles d'air vers le profileur qui capte et enregistre cet écho, et permet de mesurer des profils verticaux de la vitesse de l'eau, en utilisant l'énergie acoustique. L'appareil mesure également sa vitesse de déplacement par rapport au fond, les profondeurs, et peut aussi établir un profil des concentrations de matières en suspension.

### 3.2.2.2. Les méthodes incomplètes

Dans ces méthodes, le champ des vitesses est exploré de façon partielle. On distingue :

#### 3.2.2.2.1. Méthode à Ultrasons

Dans un plan horizontal du chenal, se mesure la vitesse moyenne de l'écoulement à partir de transducteurs situés sur les berges de la rivière, à une même profondeur, décalés de manière à ce que la trajectoire horizontale de l'impulsion acoustique fasse un angle compris entre 30 et 60 degrés avec le sens de l'écoulement.

Le débit de l'écoulement est obtenu en faisant le produit de cette vitesse moyenne par l'aire de la section mouillée déduite de la hauteur d'eau.

### **3.2.2.2. Méthode du Bateau mobile**

Le principe de ce type de jaugeage est de réaliser à vitesse constante plusieurs traversées successivement d'une rive à l'autre et s'effectue à l'aide d'un moulinet hydrométrique fixé sur une perche à l'avant du bateau étant maintenu exactement dans la section transversale qui mesure les vitesses d'écoulement et distances horizontales et les profondeurs sont mesurés avec un sondeur acoustique. Pour faciliter les manœuvres du bateau, la distance effective de mesurage est définie par deux bouées ancrées à une quinzaine de mètres à l'amont de la section et à quelques dizaines de mètres de chaque rive.

### **3.2.2.3. Méthode des Flotteurs**

On peut utiliser des flotteurs de surface qui peuvent être soit artificiels (bouteilles en plastiques) soit naturels (arbres, grosses branches, etc.) ou des bâtons lestés. Le déplacement horizontal d'un flotteur de surface durant un temps  $t$  permet de déterminer la vitesse de l'écoulement de surface. La profondeur d'immersion des flotteurs de surface ne doit pas dépasser le quart de la profondeur du cours d'eau. On ne doit pas les utiliser si l'on pense qu'ils subiront les effets du vent.

Les flotteurs peuvent servir à la détermination des vitesses de l'écoulement en surface, en profondeur, ou moyenne sur une verticale

$$Q = k \times V_m \times S \quad [3]$$

- $k$  : coefficient de débit inférieur ou égal à 1 (sans dimension) ;
- $V_m$  : vitesse moyenne (en m/s) donnée par le temps moyen mis par le ou les flotteurs pour parcourir une distance ;
- $S$  : section mouillée (en  $m^2$ ).

### **3.2.2.3. Les méthodes globales :**

La mesure du débit s'effectue de manière directe. Les principales méthodes sont :

#### **3.2.2.3.1. Méthode électromagnétique**

Les mesures au capteur électromagnétique, basés sur l'application du principe de Faraday sur l'induction électromagnétique « tout conducteur en mouvement dans un champ magnétique



est traversé par un courant électrique », ont été appliquées pour la première fois par Green et Hershy en 1974. L'application de ce principe permet d'écrire :

$$Q = f(F) \quad [4]$$

La méthode électromagnétique conviendra bien, en particulier, pour les cours d'eau encombrés de végétation, fortement chargés de sédiments ou avec un lit mobile.

### **3.2.2.3.2. Méthode volumétrique**

Les méthodes "volumétriques" (ou jaugeage capacitif) consiste à déterminer le débit directement à partir du temps de remplissage d'un volume donné à l'aide d'un chronomètre. Cette technique n'est généralement pratiquée qu'aux petits débits (quelques litres par seconde) et aux petites sections. Pour augmenter la précision, l'opération doit être répétée plusieurs fois et les valeurs cohérentes doivent être moyennées, on fait la moyenne des trois mesures et on utilise la formule :

$$Q = V / T_{\text{moy}} \quad [5]$$

V : volume

$T_{\text{moy}}$  : temps moyen de remplissage

Cette méthode est simple, rapide et peu coûteuse.

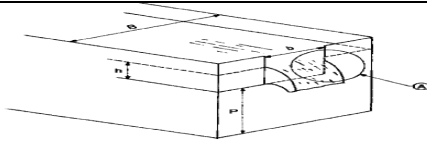
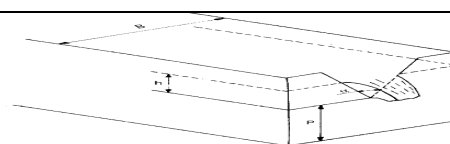
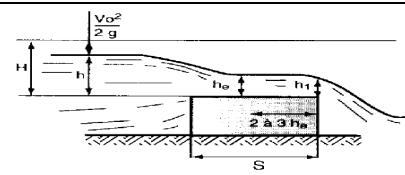
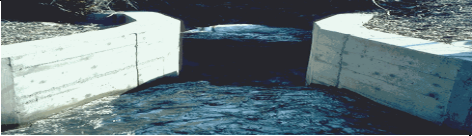

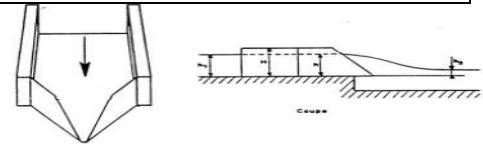
### **3.2.2.3.3. Seuils jaugeurs**

Ces méthodes peuvent être mises en œuvre lorsque l'écoulement se produit sur des ouvrages de structure bien déterminée tels qu'un déversoir ou un canal calibré comme montré en figure 26, pour lesquels le débit peut être obtenu à partir, notamment, de la hauteur d'eau mesurée à l'amont de l'ouvrage, et en principe sans jaugeage sur le terrain. Leur fonctionnement obéit aux lois de l'hydraulique classique.

Les principaux seuils utilisés sont les déversoirs en mince paroi ou de type épais, les canaux Venturi (contraction latérale et seuil épais) et Parshall (contraction latérale, seuil épais et rupture de pente).

Le tableau 1. Récapitule les avantages et les inconvénients de ces méthodes

**Tableau 1.** Les principaux seuils utilisés (d'après A. Wyss, modifié)

Ouvrage	Avantages	Inconvénients	Précision sur coeff. de Q	Schémas et photographie des ouvrages
Déversoir rectangulaire en mince paroi	Bon marché Relativement facile à mettre en place	Dépôts en amont du seuil Chute nécessaire Plage de mesure peu étendue	1 à 4%	
Déversoir triangulaire en mince paroi	Idem rectangulaire Permet de mesurer de très faibles Q Large plage de mesure	Idem rectangulaire Colmatage à la base du V Moins bonne résolution Dh/DQ	1 à 2%	
Déversoir à seuil épais	Moins sujet à l'engravement Dh amont-aval faible	Nettement moins bonne résolution Dh/DQ	2 à 5%	
Canal Venturi	Large plage de mesures Bon autocurage Possible avec faible pente	Cher et délicat à installer Moins bonne précision sur les bas débits	2 à 5%	
Canal Parshall	Idem Venturi Autocurage encore meilleur	Plus délicat à réaliser que le Venturi	2 à 5%	
Type "H Flume"	Construction simple Très large plage de mesure par ouvrage Combinaison des avantages du dév. en V et du Venturi	Dépôts en amont, mais moins importants que pour les déversoirs Chute nécessaire	Similaire au déversoir en V	

### 3.2.2.3.4. Dilution chimique

C'est une méthode "**physico-chimiques**" qui repose sur l'évolution du degré de dilution par le cours d'eau d'un corps en solution qu'on y injecte. Cette dilution est notamment fonction du débit, supposé constant le long du tronçon, concerné pendant la durée de la mesure. On a la formule suivante :

$$Q = K \times D \quad [6]$$

Où :

$Q$  : débit du cours d'eau [l/s] ;

$K$  : facteur de dilution du traceur ;

$D$  : représente la dilution :  $D = (C_1/C_2)$  [7]

Avec

$C_1$  : concentration de la solution injectée dans le cours d'eau [g/l] ;

$C_2$  : concentration de la solution restante dans des échantillons prélevés à l'aval du point d'injection dans le cours d'eau [g/l] ;

Elle s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent ou pour lesquels on ne trouve pas de section se prêtant à des jaugeages au moulinet par deux principales méthodes et le tableau illustre les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes :

**Tableau 2.** Comparaison des deux méthodes de jaugeage chimique.

Méthode d'injection	Avantages	Inconvénients
Injection à débit constant	*Meilleure précision (grand nombre d'échantillons analysés)	*Meilleure précision (grand nombre d'échantillons analysés) *prélèvements et analyses de nombreux échantillons
intégration (injection instantanée).	*matériel simple, gain de temps et de traceur, peu d'analyses	*moins bonne précision (difficulté d'évaluer le temps de passage et d'avoir un échantillon moyen caractéristique)

Pour les deux méthodes, les conditions générales sont les mêmes :

- le débit de la rivière doit rester à peu près constant pendant la mesure ;
- le traceur doit passer dans sa totalité par l'emplacement de prélèvement des échantillons ;
- à la hauteur des prélèvements, le mélange doit être tel qu'en chaque point de la section du cours d'eau, doit passer la même quantité de traceur.
- Les traceur les plus utilisés sont soit minéraux ou organiques tel que : le sel de cuisine, Le bichromate de sodium, chlorure de lithium, l'iodure de sodium, le nitrite de sodium et le sulfate de manganèse .ces traceur sont des substances qui remplient les conditions suivantes:
  - a) elle se dilue facilement dans l'eau du cours d'eau aux températures ordinaires;
  - b) elle n'existe pas déjà à l'état naturel dans le cours d'eau, ou alors en quantités négligeables;
  - c) elle ne se décompose pas dans l'eau du cours d'eau, et n'est ni retenue, ni absorbée par les sédiments, la flore ou la faune aquatiques;
  - d) sa concentration peut être mesurée de façon exacte par des méthodes simples;
  - e) elle est inoffensive pour l'homme, les animaux et la végétation aux concentrations utilisées dans le cours d'eau.

### **Autres application des traceurs**

L'application des traceurs dans les domaines de recherche est très vaste, on peut noter par exemple : l'analyse de la recharge des nappes d'eau souterraines, leur datation ainsi que l'estimation de leur contribution au débit des rivières et leurs interactions avec l'eau provenant d'autres sources. Parmi les traceurs utilisés en hydrologie, les traceurs isotopiques ont été privilégiés. Les isotopes naturels les plus utilisés pour l'analyse du cheminement de l'eau sont les isotopes stables :

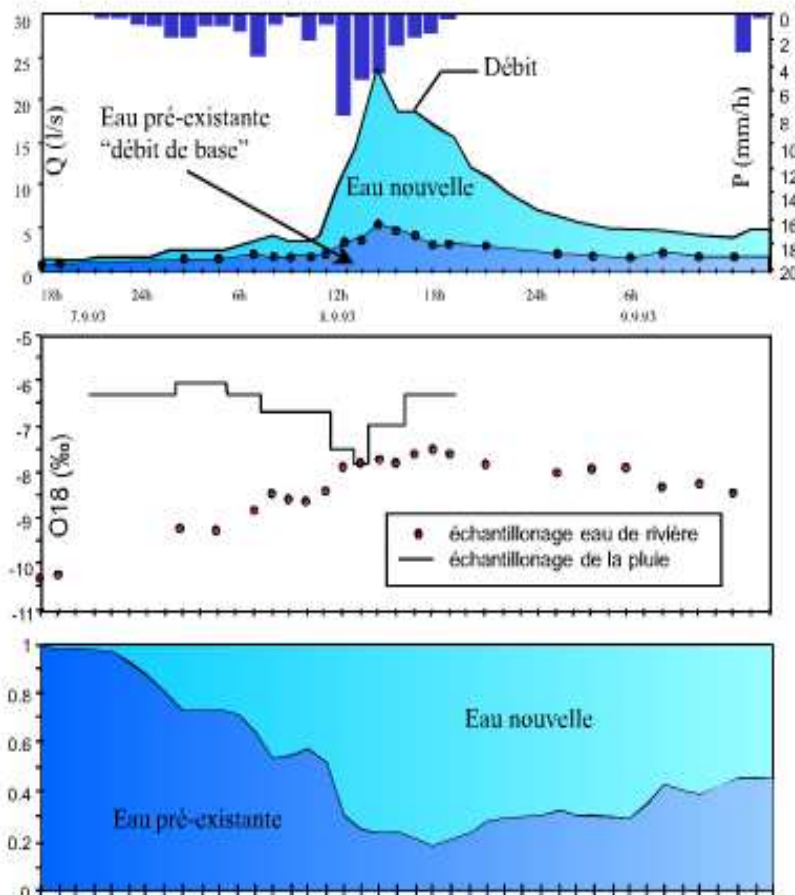
- hydrogène lourd ou deutérium ( $^2\text{H}$ ) et
- l'oxygène 18 ( $^{18}\text{O}$ ).

Et des traceurs chimiques tel que

- Des cations : Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium.
- Des anions : Chlorures, Nitrates, Sulfates ainsi que la silice.

### Exemple d'application : modèle à deux composantes

D'après D'après Iorgulescu (1997) cité in Musy (2002), l'exemple ci-dessous montre la séparation entre eau nouvelle et eau ancienne à l'aide de l'Oxygène 18. L'événement analysé est une crue ayant eu lieu sur le bassin versant de Bois-Vuacoz (24 ha) entre le 7 et le 8 septembre 1993 (les mesures pluviométriques sont effectuées au pas de temps horaire). L'épisode pluvieux est considéré comme étant de volume important (45 mm) mais d'intensité modérée (intensité maximale = 9 mm/h). La figure 23 ci-dessous montre successivement le résultat de la décomposition isotopique en termes de débit, l'évolution des teneurs en Oxygène 18 de l'eau de la pluie ainsi que de l'eau de la rivière et, en dernier lieu, l'évolution relative de la quantité d'eau ancienne, eau nouvelle dans le débit mesuré. On peut noter l'importance de l'eau ancienne au début de l'événement ainsi que l'augmentation rapide de la fraction d'eau nouvelle dans le débit de la rivière.



**Figure 23.** Séparation isotopique des écoulements et variation des teneurs isotopiques pour l'événement du 7-8 septembre 1993 (D'après Iorgulescu, 1997).

### 3.3. L'établissement de la courbe de tarage

L'objectif principal dans le tarage d'une station hydrométrique, est de déterminer la relation qui existe entre les hauteurs relevées sur une échelle limnimétrique et les débits qui leur correspondent, malgré que sa détermination peut être impossible même d'une manière approximative à cause de l'insuffisance des données et/ou l'instabilité géométrique du bief hydrométrique.

La définition de la relation  $Q=f(h)$  entre la hauteur d'eau et le débit nécessite que l'hydrologue dispose d'un ensemble d'informations sur le bief et la station hydrométrique sur la chronique limnimétrique et des jaugeages en nombre et qualité variables.

La précision d'un jaugeage dépend de celle de chacun de ces deux termes :

La hauteur associée est généralement déterminée avec une précision inférieure à 1 % (1 cm pour 1 m).

Le débit est par contre rarement mesuré avec une précision meilleure que 5 %. L'imprécision dépasse 10 % pour les jaugeages de très basses ou hautes eaux et peut atteindre 25, voire 50 % pour des mesures partielles ou des estimations. (André, 1976)

Une fois la courbe hauteur/débit tracée avec un nombre suffisant de points, il est nécessaire d'observer son allure générale.

On distingue trois grandes catégories de tarages (P. Dubreul et al, 1998) :

- Les tarages univoques des stations à géométrie stable et à contrôle hydraulique permanent.
- Les tarages non-univoques des stations situées dans des biefs à géométrie plus ou moins rapidement variable.
- Les tarages non-univoques des stations situées dans des biefs à régime hydraulique non permanent.

### **3.4. Calcul du débit de ruissellement**

Le bassin versant est considéré comme une seule entité qui réagit de façon homogène à un événement pluvieux. Cela a été discuté de façon détaillée dans de nombreuses méthodes (T. Bruno, 2005), (Smith, et al, 1984) et (Caquot, 1941). Dans ce qui suit nous allons présenter quelques méthodes de calcul du débit.

### 3.4.1. La méthode rationnelle

Les origines de cette méthode sont relativement obscures (Singh, 1988). Les hypothèses de base de la méthode rationnelle, ont été publiées en 1850 à l'Irlande par (Mulvany,1850) dans le revue des ingénieurs de génie civil :

- 1- L'intensité de la pluie  $I$  est constante dans le temps et dans l'espace;
- 2- Toutes les pertes par infiltration, rétention et évaporation sont ramenées à un coefficient de ruissellement  $C$  constant dans le temps;
- 3- La surface contributive au ruissellement augmente linéairement en fonction du temps pour atteindre la superficie totale du bassin  $A$  au temps  $t =$  temps de concentration ( $t_c$ ). Cette méthode a été utilisée en 1889 par Kuichling qui a appliqué le même concept de cette fois-ci explicitement au milieu urbain.

Pour une pluie de durée égale le temps de concentration  $t_c$  du bassin versant. Dans ce cas, le débit de pointe  $Q_p$  ( $m^3/s$ ) à l'exutoire du bassin de drainage est donné par la formule suivante :

$$Q_p = K C I A \quad [8]$$

Où :

- K : coefficient de conversion (0,0028 en SI)
- C : coefficient de ruissellement
- I : intensité de la pluie (mm/h)
- A : superficie du bassin (hectares)

### 3.4.2. La nouvelle Méthode Rationnelle de (Turraza)

Cette méthode admette que la fréquence du débit de pointe déterminé est égale à celle de la pluie maximale sur le temps de concentration, elle se présente sous la forme pratique

$$Q_{\max f\%} = \frac{C \cdot P t_{c f\%} \cdot S}{3.6 \cdot t_c} \quad [9]$$

- $Q_{\max f\%}$  : Débit maximal instantané de la crue de fréquence  $f$  ( $m^3/s$ ).
- $C$  : Coefficient de ruissellement du bassin par la crue considérée (pour la même fréquence).
- $t_{c f\%}$  : Temps de concentration de la crue de fréquence  $f$

Nous pouvons utiliser les valeurs de C proposées par Turraza, qui sont fonction du degré de couverture végétale et de la nature du sol.

### 3.4.3. La méthode de Caquot

Cette méthode est basée sur un bilan de masse des eaux et a été développée dans les années 40. Elle a fait l'objet d'une circulaire parue en 1949. La méthode de Caquot ou méthode superficielle est une forme globaliste de la méthode rationnelle. Elle représente une évolution par rapport à la méthode rationnelle en évitant d'être limitée par l'estimation des temps de concentration d'une part et en prenant en compte les possibilités de stockage des eaux sur le bassin versant.

$$Q_p = \left[ \frac{a\mu(E)^b}{6(\beta + \delta)} \right]^{\frac{1}{1-bf}} C^{\frac{1}{1-bf}} I^{\frac{cb}{1-bf}} A^{\frac{1-l+db}{1-bf}} \quad [10]$$

Avec :

$\delta$ : paramètre sans unité ;

$Q_p$ : débit de pointe m<sup>3</sup>/s ;

$\beta$  : paramètre ;

V : volume précipité en m<sup>3</sup> ;

$\alpha$  : coefficient d'abattement spatial de la pluie ;

C : coefficient de ruissellement ;

A : superficie du bassin versant (ha) ;

f: facteur multiplicatif lié aux unités.

### 3.4.4. La méthode de SCS (Le Soil Conservation Service)

Le Soil Conservation Service (SCS) a développé une procédure pour estimer la hauteur de ruissellement à partir de la hauteur totale de pluie tombée cette procédure porte le nom de méthode du CN du SCS.

Détermination du débit unitaire :  $qu = (P f * A) / T_p \quad [11]$



Détermination du débit de pointe :

$$Q_p = q_u \left( \frac{T}{T_p} \right)^{3.79} e^{-(1-T/T_p)} \quad [12]$$

Avec :

$P_f$  : facteur de pointe =484

$A$  : surface du bassin (mi<sup>2</sup>)

$T_p$  : temps de pointe ou :  $T_p = 2/3 * t_c$  [13]

$t_c$  : temps de concentration

En raison de la grande variété de données utilisées par cette méthode, l'on peut conclure que l'estimation du débit provenant de cette méthode est plus proche à la valeur réel du débit par rapport aux autres méthodes.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes, plus courantes, de mesure (jaugeage) et de calcul des débits de ruissellement. Le jaugeage s'effectue par diverses méthodes et le choix d'une méthode est conditionné par divers facteurs. On peut citer: la configuration du site et les conditions d'écoulement, le matériel de mesure et le temps disponibles, le nombre de personnes pouvant participer à la mesure et la précision que l'on souhaite obtenir. Pour la détermination précise d'un débit dans les conditions naturelles, la réalisation effective de mesures sera toujours préférable à l'application de formules hydrauliques.

Avant l'émergence des moyens de calculs puissants que constituent les ordinateurs, des méthodes simples et robustes devaient être utilisé dans le calcul du débit. Certaines de ces méthodes, on été présentées dans ce chapitre tel que la méthode rationnelle, de Caquot, de Turraza et la méthode de SCS.

## **Chapitre 4. La Simulation de Pluie**

### **4.1. Introduction**

La définition littérale du mot 'pluie' est la suivante : « Eau qui tombe en gouttes des nuages sur la terre » (d'après le dictionnaire Robert). La pluie implique de nombreuses manifestations physiques perceptibles se caractérise par une grande variété de tailles de gouttes et de débits, cette hétérogénéité représente une très grande contrainte pendant les études expérimentales et de ce fait il soit intéressant de reproduire de manière artificielle les différents types de pluie. Vu l'importance de la simulation de pluie, nous nous intéresserons dans ce chapitre à la définition, à l'historique, au développement et à l'intérêt des études sous pluie simulée.

### **4.2. Définitions**

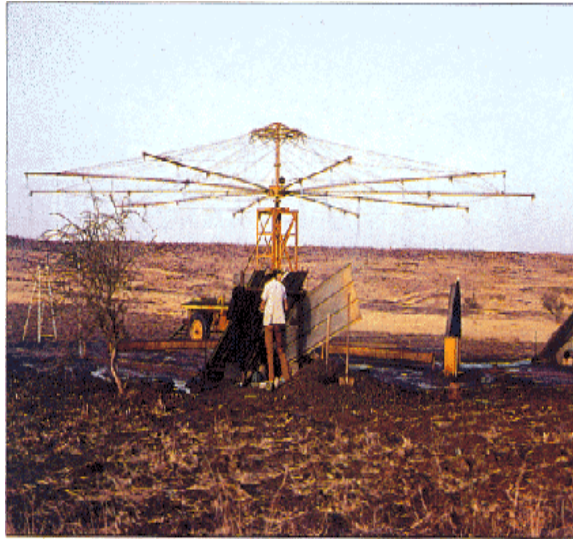
Le simulateur de pluie est un appareil qui permet d'apprécier et de quantifier rapidement, et en conditions contrôlées, l'influence des différents paramètres impliqués dans les processus intervenant à la surface et dans les premiers décimètres du sol lors d'une pluie (infiltration, battance, ruissellement, érosion et transport de particules et de polluants organiques ou minéraux).

### **4.3. Historique des mesures sous pluies simulées**

L'évolution progressive des techniques d'étude de l'hydrodynamisme des sols est le but essentiel des travaux qui ont été menés sous pluies simulées.

La quantification et l'aptitude au ruissellement différent types de sol ont toujours constitué un grand intérêt pour les hydrologues. Pour cela ces chercheurs ont depuis fort longtemps utilisé l'infiltromètre à double anneaux (Muntz) ou bien la méthode Prochet qui ne permettait d'obtenir dans des cas que des résultats à caractère qualitatif.

Les hydrologues et pédologues de l'ORSTOM ont utilisé depuis les années 70 des simulateurs de pluies qui permettent de considérer les aléas des précipitations naturelles. Un premier simulateur de pluie Swanson (figure 24) a été utilisé de 1975 à 1980 par une équipe pluridisciplinaire de l'ORSTOM sur des sites de 50m sur 10m situés en zone tropicale humide et sahélienne sèche. Les résultats de ces travaux constituent une véritable référence dans le milieu de la recherche scientifique.



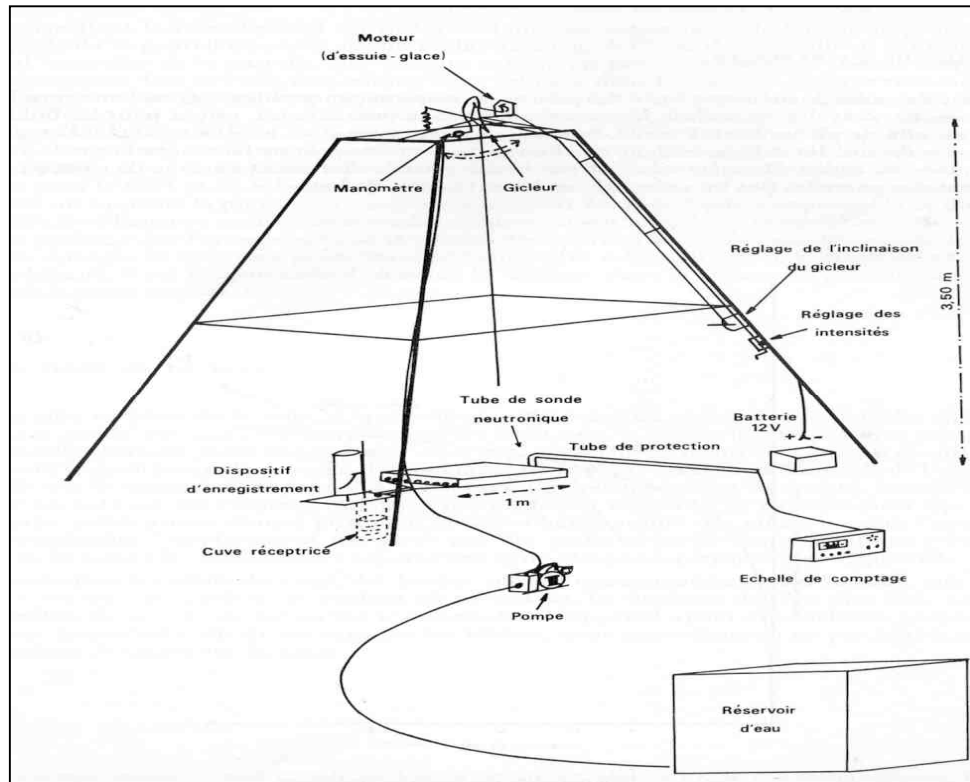
**Figure 24.** Le simulateur de pluie de type Swanson  
(Tiré de Casenave et Valentin, 1989)

Cet appareil n'a pas que des avantages mais aussi des inconvénients car son poids, le coût de son transport, son installation et son fonctionnement constituent un véritable handicap. Ces problèmes ont conduit (Asseline et Valentin, 1977) à concevoir un modèle moins onéreux ayant une plus grande mobilité (figure 25).

Ce mini simulateur a été utilisé pour la première fois en 1977 pour étudier les crues décennales des bassins versant de la zone forestière tropicale et déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des différents sols forestiers. Il semble que ce soit aux USA que l'intérêt pour ces techniques se soit développé avec les infiltromètres à aspersion ainsi que les simulateurs de pluies. Mais dans le monde et depuis des décennies, de nombreux simulateurs de pluie ont été élaborés et utilisés. nous citerons ci-dessous quelques exemples (A. Casenave, 1982) :

- Australie : Kinnel (1974) et Walker (1977) à Cambera, Grierson (1975) dans le Waite South,
- Belgique : Gabriel (1975);
- Etats-Unis : Wiln (1943) dans le Maryland, Ker (1954), Meyer (1955), Meyer et Mc Cune (1958) et Hermsmeier (1963) dans l'Indiana, Bertrand et Parr (1960), Barnes (1957) à l'université du Wyoming, Mutchler (1963) et Epstein (1966) à l'Université du Maine, Black (1972) à New York, Peterson (1977) dans le Colorado, Lusby (1977) dans le Colorado, l'Arizona et le Montana; - Israël : Steinhardt (1966) et Rowitz (1972) à l'Université de Rehovot, Morin (1967) à Emek ;

- Nouvelle Zélande : Selby (1970);
- Ouganda : Ross (1960);
- Royaume Uni : Nassif (1975) à l'université Salford Lancashire.



**Figure 25.** Le simulateur de pluie de type ORSTOM (Tiré de Casenave, 1982).

#### 4.4. Dispositifs de simulation

Le banc d'essai d'hydrologie est un appareil utilisé au laboratoire comme modèle réduit du système hydrologique. Muni d'un simulateur de pluie, il sert à montrer, à petite échelle, quelques processus physiques concernant l'hydrologie et l'hydrogéologie en effectuant des essais fondamentaux sur le processus d'écoulements et sur l'infiltration sous une pluie simulée (figure 26).



**Figure 26.** Dispositif de simulation (d'après le bulletin technique du banc d'essai).

#### **4.5. Intérêt des études sous pluies simulées :**

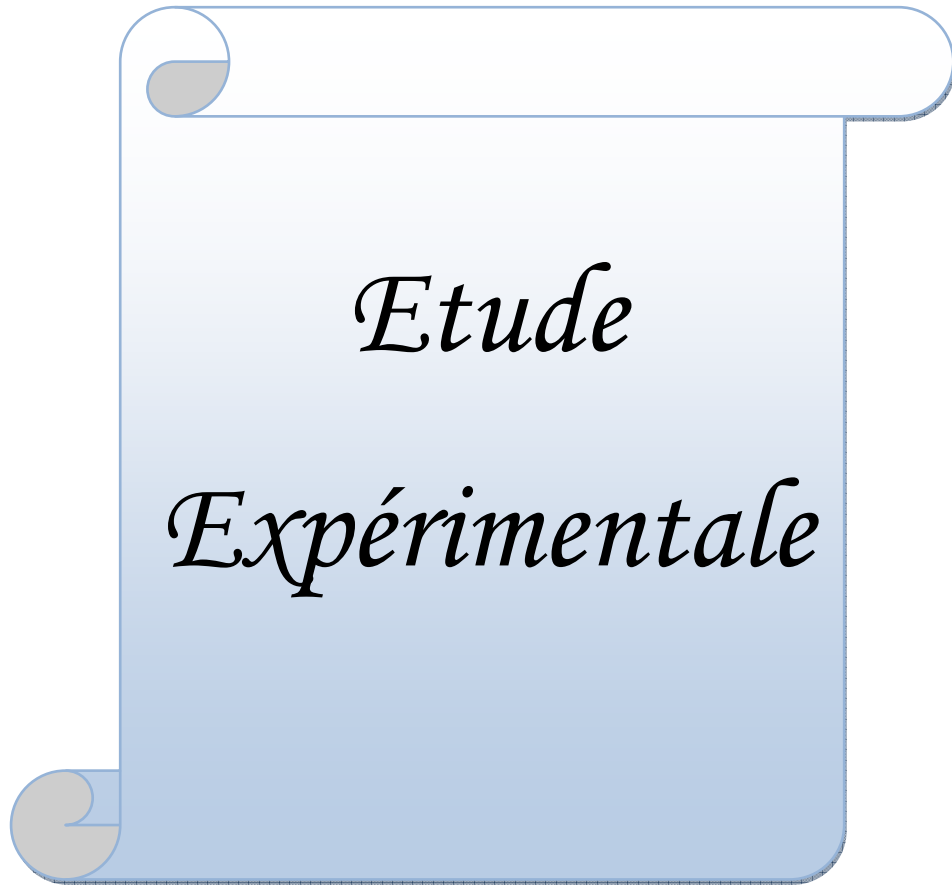
Les nombreuses études réalisées jusqu'à présent dans le domaine des relations eau-sol (bassins versants, parcelles d'érosion ou de ruissellement, bilans hydriques des sols, etc...) Se heurtaient à :

- ✓ Un problème **d'analyse des paramètres** : qui ont une influence sur l'infiltration et le ruissellement. il est difficile sous pluies naturelles, de mettre en évidence leur rôle respectif a cause leur nombre et de leurs interactions,
- ✓ Le simulateur de pluie, qui permet de fixer l'état d'humectation du sol selon la volonté du chercheur par des arrosages successifs, de tester différents types de sols, d'états de surface, de couvertures végétales ou de pentes, autorise une analyse beaucoup plus fine des phénomènes.
- ✓ Un problème **de durée des études** : a pu être réduite grâce aux mesure sous pluie simulée il est nécessaire de prolonger les mesures sur plusieurs années, Pour avoir des résultats fiables sous pluies naturelles par contre Grâce aux mesures sous pluies simulées, la durée des études a pu être réduite de façon très sensible pour un résultat d'une précision sensiblement égale, sinon supérieure dans certains domaines, a celle des mesures classiques.
- ✓ Un problème **d'extension spatiale des résultats** : les mesures effectués sous pluies naturelles se limite pour un petit nombre de site, en revanche sous pluies simulées, elles sont beaucoup plus rapides, permettent pour un même investissement de tester un nombre de sites bien plus élevé.

- ✓ Un problème **d'expérimentation** : Les études sous pluies simulées ont permis de réaliser à la fois des mesures d'infiltration et de ruissellement sur la même parcelle.

#### **4.6. Conclusion**

La simulation est une technique assez instructive quant à la quantification et l'aptitude au ruissellement différents types de sol. Les dispositifs utilisés peuvent être très coûteux et lourds lorsqu'ils sont utilisés sur terrain, mais peuvent aussi être très légers et moins encombrants pour les essais au laboratoire. Ils sont très avantageux et permettent le contrôle de plusieurs facteurs entrant en jeu dans la relation chute de pluie – écoulement.



*Etude*

*Expérimentale*

## **Chapitre 5. Matériel et Méthodes**

### **5.1. Introduction**

Depuis longtemps, les hydrologues essaient de collecter les données nécessaires pour quantifier les probabilités de ruissellement de l'eau des pluies et les possibilités d'infiltration de l'eau dans le sol, par plusieurs méthodes empiriques ou expérimentales.

Les études hydrologiques expérimentales se réalisent soit sur terrain naturel (parcelle limitée), soit dans un laboratoire (exp : banc d'essai d'hydrologie) et il est certain que l'exactitude de ces études induits par l'hétérogénéité des précipitations naturelles. Le simulateur de pluie est la solution idéale à fin de reproduire à volonté des événements pluvieux contrôlés.

L'objectif général de la présente étude sous pluie simulée est d'améliorer la compréhension des comportements hydrologiques du sol utilisé et elle est basée essentiellement sur la mesure directe et l'observation des processus hydrologique exclusivement le ruissellement et l'infiltration.

Ce chapitre est subdivisionné en deux parties : La première comprend une description détaillée du banc d'essai hydrologique. Dans la seconde partie nous essayerons de présenter la méthodologie de travail.

### **5.2. Le Banc d'Essai**

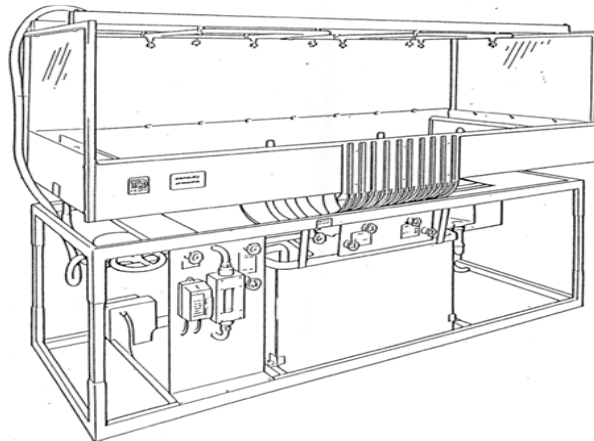
#### **5.2.1. Généralités**

Le banc d'essai d'hydrologie est un appareil utilisé au laboratoire comme modèle réduit du système hydrologique (figure 27). Il sert à montrer, à petite échelle, quelques processus physiques concernant l'hydrologie et l'hydrogéologie tel que :

- Etude des répercussions des chutes de pluie de différentes durées sur des sols de différentes saturations et d'inclinaisons diverses (écoulement superficiels uniquement) ;
- Etude des processus d'infiltration ;



- Etude de la capacité d'accumulation d'un sol ;
- Etude des répercussions des puits sur le niveau d'eau souterraine ;
- L'influence du mélange nappe superficielle /nappe d'infiltration sur l'hydrogramme de sortie ;
- Simulation d'orages multiples et d'orages en déplacement ;
- Mesure du cône de dépression de deux sources adjacentes ;
- Assèchement des chantiers d'excavation par l'utilisation de sources ;
- Ecoulement d'une source dans un terrain aquifère restreint ;
- Mise en évidence des bassins hydrographiques dans une ile simulée, avec chute de pluie et écoulement de source ;
- Transport d'alluvions en rivières simulées ;
- Etude de la force érosive sur des piles de pont simulées ;



**Figure 27.** Vue générale du banc d'essai (source : bulletin technique).

Notre étude s'intéresse aux deux premiers processus évoqués précédemment.

### 5.2.2. Caractéristiques techniques du banc d'essai

- **Matériel en option** : milieu perméable, utilisé pour tous travaux expérimentaux. (0,5m<sup>3</sup>)
- **Service nécessaires** : Alimentation électrique secteur monophasée, 220/240 V.-5A .ou 110 /120V .10 A.-voltage à spécifier lors de la commande.
- **Encombrement** : L'appareil, monté sur pieds, nécessite une surface au sol d'environ 2450mm×1050mm.
- **Dimensions et poids**  
Dimensions .....2450mm×1050mm×1750mm

Poids net.....340 kg

### 5.2.3. Description du banc d'essai

L'appareil, montré en figure 28, est constitué d'un grand réservoir rectangulaire en acier inoxydable dont la veine d'essai est de 2m×1m, et la hauteur normale du milieu perméable est de 150 mm. Le réservoir peut être rempli d'éléments granuleux pour former un bassin perméable, dont l'inclinaison se règle manuellement ou grâce à un mécanisme à vérin situé à une extrémité du réservoir (optionnel pour certains bancs d'essai).

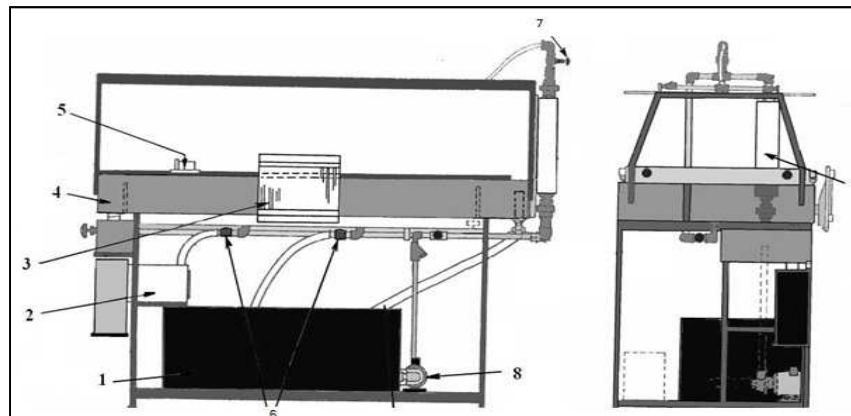
Un cadre supportant une batterie de 8 buses d'aspiration, qui servent à simuler des chutes de pluie sur le bassin, est installé au dessus du réservoir. A l'aide d'un robinet, on alimente les 8 buses, pour asperger tout le bassin. Ce système permet de faire varier le retard sur l'hydrogramme ou de simuler un orage en déplacement. Un écran plexiglas est disposé autour de l'appareil pour limiter l'arrosage uniquement à l'intérieur de la veine d'essai.

De chaque coté du réservoir, il existe des compartiments séparés du bassin par des plaques-déversoir. Ces plaques comportent des «hublots» perforés qui peuvent être utilisés soit pour drainer l'eau du bassin soit pour l'alimenter en eau à partir des compartiments d'extrémités. En son milieu, l'appareil comporte deux sources avec manchons à fin grillage en acier inoxydable et le long de sa ligne médiane une rangée de 20 prises de pression, comportant des joints à rainure spécialement étudiés pour empêcher l'entrée de sable, permettant de mesurer le profil de la nappe sur une série de tubes piézométrique placés sur le devant du bassin.

Le bassin repose sur un cadre métallique robuste, à l'intérieur duquel est placé un grand réservoir en polyéthylène densité de contenance normale 220 litres environ. Une pompe de type centrifuge et un système de robinets permettent d'amener l'eau de ce réservoir au bassin, soit par l'intermédiaire des buses d'aspersion, soit par les deux extrémités du bassin. On peut faire varier indépendamment les deux alimentations, et le débit total est mesuré par un débitmètre à flotteur, calibré de 2 à 22 l /mn. On peut mesurer l'écoulement du bassin grâce à un déversoir rectangulaire calibré adjacent au réservoir. L'écoulement provenant des sources peut également être mesuré à l'aide de se déversoir, ou éventuellement retourner directement au réservoir.

L'appareil est totalement autonome et son fonctionnement ne nécessite qu'une alimentation électrique. L'alimentation électrique de la pompe est protégée par un déclenchement

automatique en cas de pertes à la terre. Le milieu perméable utilisé dépendra de l'objectif de l'étude.



**a) vue de face**

**b) vue de profil**

- |                                   |                             |                                       |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Réservoir de stockage          | 2. Déversoir à mince parois | 3. Tableau des 20 tubes manométriques |
| 4. Bassin d'essai                 | 5. Plaque déversoir         | 6. Vannes                             |
| 7. Robinet de réglage d'intensité | 8. Pompe                    | 9. Rotamètre                          |

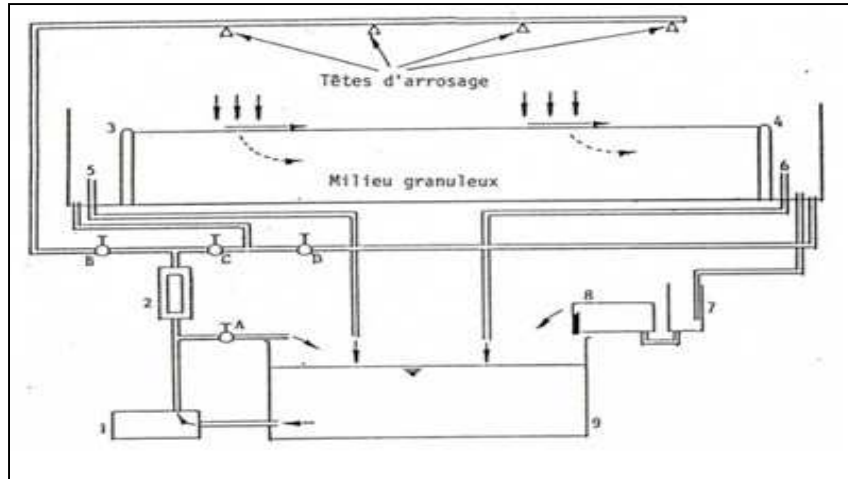
**Figure 28.** Les principaux éléments constitutifs du banc d'essai d'hydrologie.

#### 5.2.4. Fonctionnement du banc d'essai

Le banc d'essai d'hydrologie possède un grand nombre de manipulation, qui diffèrent par un simple jeu d'ouverture et de fermeture des vannes existantes.

Avec la vanne A (figure 29) ouverte et toutes les autres fermées, la pompe fera seulement circuler l'eau du réservoir de stockage sur lui-même. Si la vanne B est ouverte, l'eau passera à travers le rotamètre (jusqu'à 22 litres /min) vers les têtes d'arrosage et la chute de pluie simulée se produira.

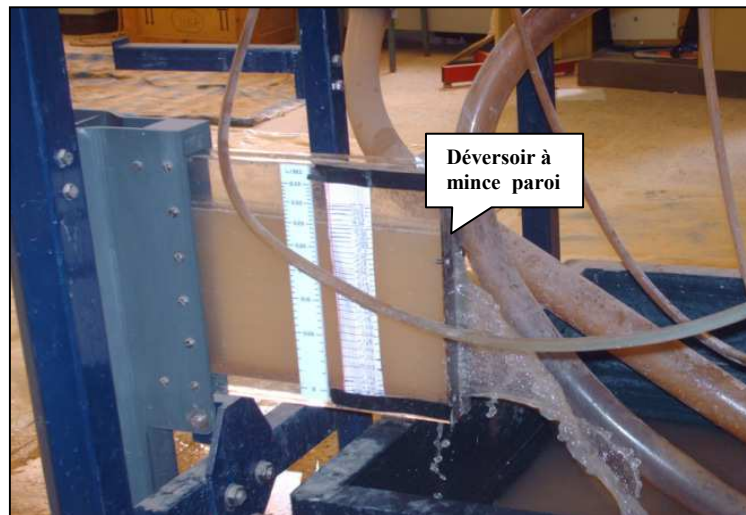
Le réglage des vannes A et B permet de contrôler la quantité de la chute de pluie ; la partie principale du réservoir devra contenir un matériau à granulométrie adéquat pour former le captage de simulation qui sera retenu entre les deux déversoirs d'extrémité.



- |                       |                              |   |
|-----------------------|------------------------------|---|
| A, B, C, D : Vannes   | 1 : Pompe                    | 2 : Rotamètre                             |
| 3, 4 : Déversoirs     | 5, 6 : sur averses réglables | 7 : Chambre de réduction de la turbulence |
| 8 : Déversoir calibré | 9 : Réservoir de stockage    |   |

**Figure 29.** Schéma de fonctionnement de l'appareil (source : bulletin technique).

Un mécanisme d'inclinaison permet de faire varier la pente du captage, et l'écoulement passe à travers un déversoir rectangulaire à paroi mince (figure 30). La mesure du débit de ruissellement se fait à ce niveau.



**Figure 30.** Le déversoir à mince paroi

Les 20 prises piézométriques, sont placées le long de la veine d'essai, pour la visualisation et la lecture de la charge d'eau sous le milieu granuleux (figure 31). La charge est mesurée au niveau des tubes piézométriques (figure 32).



Un niveau à bulle est fourni pour vérifier que l'appareil est à l'horizontal lorsque cela est nécessaire à l'expérimentation

### **5.3. Le milieu perméable**

Le matériau granuleux adéquat pour toutes les expériences décrites ci-dessous est un milieu équivalent à du sable limoneux dont la taille des particules est de 0.1 à 1.5 mm. Le choix du captage de simulation (sol) était fixé pour des raisons de disponibilité. Toutefois et vu le nombre important d'essais, des déperditions de matériau étaient constatées et le nombre d'essais par conséquent limité.

## **5.4. Méthodologie et Protocole expérimental**

### **5.4.1. Manipulation du banc d'essai**

L'appareil est monté avec un milieu granuleux adéquat tel que du sable limoneux constituant le captage de simulation et remplissant la partie principale de l'appareil à un niveau juste inférieur à la crête du déversoir à chaque bout. Le mécanisme de pente est actionné pour incliner le captage. Les deux vérins doivent être utilisés ensemble et on doit s'assurer que le réservoir n'est pas tordu. Pour simuler le comportement d'un écoulement de captage naturel vers une rivière ou un cours d'eau, les orifices du déversoir aval (éléments 4 dans la figure 28) doivent être retirés pour assurer l'écoulement souterrain. Le système de trop plein est relevé de manière que l'eau ne pénètre pas, et la tubulure d'admission partant de la vanne D est fermée, dès lors toute l'eau parcourant le captage sera réceptionnée par le déversoir à paroi mince pour effectuer les mesures. La pompe est mise en marche et la vanne B (et A si nécessaire) réglées pour permettre un jet régulier des têtes d'arrosage. Le débit à travers le rotamètre est alors relevé. Lorsque l'écoulement résultant passe au dessus du déversoir à paroi mince, la hauteur d'eau au dessus de celui-ci et le temps correspondant écoulé depuis le début de la chute de pluie doivent être relevés ainsi que le taux d'infiltration au niveau des tubes piézométriques.

Durant l'expérience, les relevés de la hauteur d'eau au niveau du déversoir à paroi mince sont effectués à intervalles réguliers, toutes les 10 secondes.

Dès que la pluie cesse (pompe arrêtée au bout de 5 minutes de marche), la vanne B est fermée. Les relevés de débit (en l/s) sur le déversoir se poursuivent jusqu'à tendre vers zéro.

L'hydrogramme de l'écoulement en fonction du temps peut alors être tracé. La surface sous l'hydrogramme représente le volume total ruisselé, la différence entre cette valeur et la pluie précipitée, est la quantité d'eau stockée dans le captage.

Pour tous les essais, les vannes B, C et D sont fermées.

#### **5.4.2. Les préparatifs avant l'exécution des essais**

La préparation du laboratoire est une étape très essentielle dans les études expérimentales et dans la présente étude. Ces préparatifs concernent essentiellement le sol et l'appareil. Le sol est un paramètre très important, qui nécessite le plus grand soin lors de sa manipulation et mise en place.

En raison de l'indisponibilité du sol utilisé en quantités suffisantes, nous avons eu recours à des manipulations de séchage du sol utilisé lors des précédents essais. Le séchage était effectué à l'air libre. Le taux d'humidité a été déterminé par séchage à l'étuve au laboratoire. La mise en place du sol a été réalisée par couches successives en évitant les vides et les compactages. L'action de l'eau réduirait par la suite les manquements de la mise en place.

Après avoir terminé la préparation du sol, nous passons au réglage du rotamètre pour une intensité choisie. La pente est également réglée selon l'inclinaison voulue et les piézomètres mis à zéro. Les résultats attendus dépendent énormément des conditions dans lesquelles le protocole expérimental est réalisé.

#### **5.4.3. Les conditions aux limites et les conditions initiales**

Les différents essais sont réalisés sur un milieu considéré comme homogène et continu sur une épaisseur de 15cm pour tout le bassin. Le matériau utilisé est un sable limoneux uniforme dont la granulométrie variant entre 0,1 et 1,5 mm.

La distribution et l'alimentation des eaux ont été assurées de manière latérale en amont du banc d'essai et sur toute l'épaisseur de la formation. Toutefois afin de réaliser chaque essai, nous avons choisi deux débits entrants 8 l/min et 14 l/min et trois pentes (0%, 2%, 4%). Les essais ont été réalisés sur sol nu et sur sol avec couvert simulé, sous différents états d'humidité du sol.

#### **5.4.4. Réalisation des Essais**

##### **5.4.4.1. Introduction**

Dans l'étude au champ des différents aspects du comportement hydrologique d'un sol sous averses naturelles, les chercheurs sont plus ou moins rapidement limités dans leurs analyses par le grand nombre de paramètres entrant en jeu simultanément dans les processus observés. Il est préférable souvent, dans le cadre d'expérimentations au laboratoire de supprimer parfois certains des facteurs dont les rôles interfèrent. On peut toutefois agir en fixant à volonté leurs valeurs. Cependant, en supposant ces difficultés résolues, on se trouve confronté à un second problème posé par la variabilité spatiale des caractéristiques du sol en place à étudier. Dans le cas général, cette variabilité est très importante et pour résoudre le problème de la représentativité, on doit opter entre deux solutions : soit multiplier, sur le même type de sol, des essais expérimentaux portant sur des domaines quasi ponctuels et ne nécessitant donc que des dispositifs légers et maniables, soit adopter un appareillage plus encombrant mais couvrant un domaine d'investigation suffisamment étendu pour que les effets d'hétérogénéité soient masqués vis-à-vis des phénomènes résultants. Cette dernière solution est bien entendu la plus séduisante mais n'étant pas disponible dans notre cas, nous avons opté pour la première.

##### **5.4.4.2. Essais préliminaires**

Ces essais ont été conduits au Laboratoire d'Hydraulique du département, dans le but de vérifier la fonctionnalité du banc d'essai et de connaître les facilités et difficultés qu'offrent en général ce genre d'expérimentations. De plus ce test permettra de définir quelle est l'intensité qui fournit le régime d'infiltration totale pour lequel on n'observe aucun ruissellement. Cette première série d'essais a porté essentiellement à déterminer l'influence des conditions antécédentes d'humidité sur la réponse hydrologique.

Ces essais ont été réalisés au laboratoire sur le banc d'essai et sous pluies simulées. Le sol était constitué d'un sable limoneux. Le dispositif expérimental est celui décrit plus haut. Différents états d'humidité ont été testés. Autrement différents espacements dans le temps ont caractérisé ces essais. Durant ces premiers essais, le bassin a été réglé selon une pente nulle. Les expériences présentées ont été effectuées sur sol nu. Le tableau 3 illustre les différentes conditions sous lesquelles les essais ont été effectués :



**Tableau 3.** Conditions expérimentales des essais préliminaires

N° de l'essai	Durée d'humidification avant l'essai (heures)	Etat d'humidité antécédent	Pente %	Couverture végétale	Intensité l/min
1	20 h	Très humide	0	Aucune	8
2	720 h	Sec	0	Aucune	8
3	240 h	Humide	0	Aucune	8
4	168 h	Humide	0	Aucune	8
5	24 h	Très humide	0	Aucune	8
6	120 h	Humide	0	Aucune	8

En ce qui concerne la définition du taux d'humidité initial utilisé dans le tableau ci-dessus, celui-ci est déterminé par la méthode de double pesée. Soit un échantillon X de poids initial  $P_i$ , celui-ci est séché pendant 24 h à l'étuve à 105 °C, puis pesé de nouveau, avec un poids  $P_f$ . La différence des pesées rapportée au poids initial donne le taux d'humidité en %.

#### **5.4.4.3. Essais de simulation**

Ces essais ont été conduits dans le but de mettre en évidence l'influence de certains facteurs intervenants sur la réponse hydrologique à savoir : l'influence des conditions initiales d'humidité du sol, l'influence de la pente, l'influence de l'intensité de la pluie, l'influence du couvert végétal. Les essais ont été réalisés sur le même dispositif expérimental qui a servi pour les essais préliminaires. Les essais de détermination du ruissellement sous pluies simulées étaient plus nombreux et variés en raison des paramètres mis en jeu durant ce processus.

En raison de l'indisponibilité du sol utilisé en quantités suffisantes, nous avons eu recours à des manipulations de séchage du sol utilisé lors des précédents essais. Le séchage était effectué à l'air libre. Le taux d'humidité a été déterminé par séchage à l'étuve au laboratoire. La mise en place du sol a été réalisée par couches successives en évitant les vides et les compactages. L'action de l'eau réduirait par la suite les manquements de la mise en place.

**Tableau 4.** Protocole de simulation

Type de couvert végétal	Etat d'humidité antécédente	Pente 0 %		Pente 2 %		Pente 4 %	
		Intensité 1 8 l/min	Intensité 2 14 l/min	Intensité 1 8 l/min	Intensité 2 14 l/min	Intensité 1 8 l/min	Intensité 2 14 l/min
Sol nu	Sol très humide	Essai 7	Essai 10	Essai 20	Essai 41	Essai 17	Essai 14
	Sol intermédiaire	Essai 8	Essai 11	Essai 19	Essai 40	Essai 16	Essai 13
	Sol très sec	Essai 2	Essai 9	Essai 18	Essai 39	Essai 15	Essai 12
Sol couvert	Sol très humide	Essai 35	Essai 32	Essai 23	Essai 26	Essai 38	Essai 29
	Sol intermédiaire	Essai 34	Essai 31	Essai 22	Essai 25	Essai 37	Essai 28
	Sol très sec	Essai 33	Essai 30	Essai 21	Essai 24	Essai 36	Essai 27

Nous avons défini au préalable trois états d'humidité, un état très humide, un second très sec et un troisième intermédiaire. Pour chacun de ces états, une intensité de pluie a été appliquée à la surface d'essai et maintenue constante pendant toute la durée de la simulation. Pour chaque essai, l'écoulement a été observé au droit du déversoir. Pour l'essai sur sol très humide nous avons, le jour avant l'expérience, réglé le bassin dans la position horizontale et saturer le bassin d'essai par les orifices d'alimentation. Une fois la saturation atteinte, ces derniers ont été déconnectés de la zone d'essai et le sol était drainé pendant la nuit. Le lendemain, l'essai était réalisé. Les relevés de débits ont été effectués directement sur le déversoir à paroi mince. Les mesures de l'infiltration ont été faites directement au niveau des 20 piézomètres. Après chaque événement pluvieux, la surface a été inspectée visuellement.

## 5.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du matériel utilisé lors de l'expérimentation et à la méthodologie de travail adoptée au sein du laboratoire pour répondre aux objectifs du sujet. Les deux volets de ce chapitre ont été équitablement répartis. La description du banc d'essai a été orientée beaucoup plus vers les dispositifs de mesure du débit de ruissellement et la détermination de la charge d'eau durant les événements de pluie provoqués. Une attention particulière a été accordée au déroulement des essais car une mesure mal faite peut toujours être répétée mais aura l'inconvénient d'influencer les conditions expérimentales, si l'on réalise une succession d'essais. C'est dans cet objectif qu'une série d'essais préliminaires a été conduite.

## Chapitre 6. Résultats et interprétations

### 6.1. Introduction

Pour mieux connaître le processus de l'écoulement, point important de l'activité hydrologique, il est nécessaire d'établir les relations entre l'écoulement et les facteurs qui le produisent. Pour obtenir ces relations et les vérifier, deux conditions initiales sont nécessaires :

1. L'étude du processus de l'écoulement dans l'ensemble du bilan hydrique.
2. La connaissance des facteurs génétiques : météorologiques, hydrographiques, orographiques, géobotaniques et hydrogéologiques.

Nous essayons dans ce chapitre d'étudier le comportement de l'eau en surface et dans le sol, sous une variation des différents facteurs en jeu tel que :

- ✚ L'humidité initiale ;
- ✚ La pente ;
- ✚ L'intensité pluviométrique ;
- ✚ Le couvert végétal.

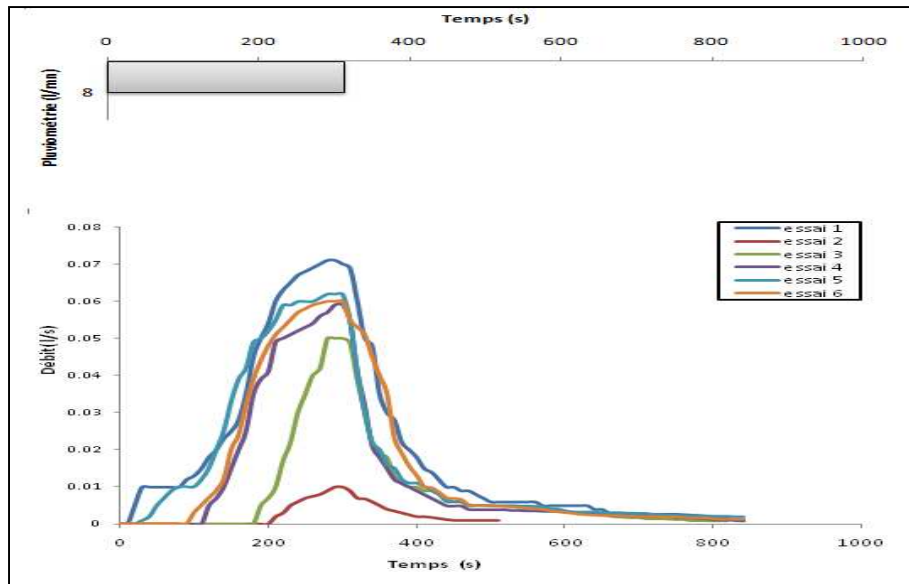
Et dans la dernière partie on s'intéressera à la décomposition graphique des hydrogrammes.

### 6.2. Essais Préliminaires

L'influence de l'état d'humidité sur la réponse hydrologique est représentée à la figure 33 qui illustre les six premiers essais effectués au laboratoire. Ces premiers résultats concernent respectivement les hydrogrammes de ruissellement. Les courbes d'infiltration sont également représentées à la figure 36

#### 6.2.1. Analyse des hydrogrammes

Les hydrogrammes de la figure ci-dessous représentent des hydrogrammes type. Nous y retrouvons les principales caractéristiques : montée ; maximum ; décroissance. D'un point de vue statistique, les hydrogrammes montrent une dissymétrie positive.



**Figure 33.** Hydrogrammes résultants en fonction des conditions antécédentes d'humidité.

Le tableau 5 rapporte les valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des hydrogrammes. L'hydrogramme résultant de l'essai N° 2 présente une forme plus aplatie que le reste des hydrogrammes. L'influence des conditions antécédentes d'humidité pour cet essai est très caractéristique. C'est un sol maintenu sans apport de pluie pendant 30 jours.

**Tableau 5.** Valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des essais préliminaires

N° d'essai	Coefficient d'Asymétrie	Coefficient d'Aplatissement
1	1.28	0.14
2	1.13	0.098
3	2.03	3.13
4	1.78	1.68
5	1.86	1.98
6	1.83	1.80

En théorie L'allure des hydrogrammes dépend :

- 1) De la durée et de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la pluie
- 2) De l'étendue de la disposition des crues du bassin comprises entre les lignes isochrones d'écoulement

3) Des conditions initiales du bassin (humidité du sol et état de la couverture végétale).

La comparaison des six hydrogrammes permet de noter quelques différences du fait des conditions expérimentales non similaires.

Pour tous les essais, il a été impératif de vérifier à ce que le processus se déroule en entier et que celui ci puisse se réaliser avec les mêmes conditions pour le sol. Cela suppose un travail de manipulation du banc d'essai et du sol, fait de manière soigneuse. Ceci est très important pour observer l'apparition ou le début de ruissellement pour chaque essai. Ainsi l'apparition du ruissellement est différée d'un essai à un autre. Par exemple pour l'essai N°2 le ruissellement a commencé après 200 secondes du début de l'averse par contre dans l'essai N°1, 20 secondes étaient suffisantes pour marquer un ruissellement.

Pour les essais N°4 et N°6, on observe pratiquement un même début de ruissellement et des courbes de montée identiques. Ces essais sont caractérisés par une durée d'humidification initiale respectivement de 07 et 05 jours. L'essai N° 03 dont la durée d'humidification initiale est de 10 jours montre un début de ruissellement bien long par rapport aux autres essais excepté celui des conditions sèches (essai N°2).

Le débit maximum est obtenu pour les fortes conditions initiales d'humidité (essai N°1). Par opposition aux courbes de décrue, les courbes de montée sont relativement bien distinctes. La concavité des courbes de montée des hydrogrammes résultants est assez remarquable au niveau du pic et est similaire pour les essais N°1 ; N°5 et N°6. Du fait de la géométrie rectangulaire du bassin d'essai, de l'uniformité du matériau sol et de l'état initial d'humidité, la variation du débit n'est pas proportionnelle sur approximativement 100 secondes avant la pointe du débit. La concavité de l'hydrogramme varie ainsi d'une manière notable d'un état d'humidité à un autre. Ceci résulte généralement de l'influence de deux facteurs :

a) Un accroissement de superficie entre des isochores adjacents situés entre les sections centrales est supérieures du bassin ;

b) Une plus grande possibilité d'infiltration, d'évaporation, de détention superficielle et interception dans les premiers moments de l'orage (Linsley et al, 1949).

Il est évident que le premier facteur est absent dans les cas expérimentaux surtout sur sol sableux. Il peut toutefois être remplacé par l'uniformité du bassin et du sol dans notre cas. L'importante infiltration au début de la simulation est prépondérante pour expliquer la forme

de variation des débits ruisselés. L'évaporation n'étant généralement pas prise en compte lorsqu'il s'agit d'évènements averse-crue relativement courts.

Les courbes de décrue sont également identiques et caractérisées par une même pente et un même point d'inflexion, marquant le changement de régime du débit et le retour vers le débit de base.

Pour l'ensemble des essais, nous avons effectué la décomposition graphique des hydrogrammes et on peut déterminer le volume total de ruissellement par la méthode suivante, l'écoulement total correspondant à une averse ou à une période pluvieuse est l'aire située sous l'hydrogramme et dans le tableau suivant nous récapitulons les résultats obtenus.

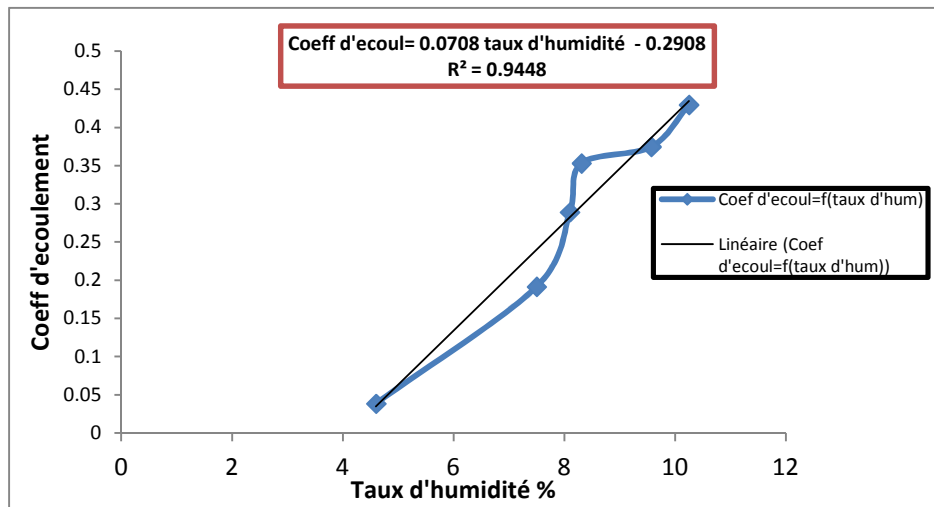
Les volumes ruisselés varient d'un essai à un autre (tableau 6). L'essai N°1 fournit le volume le plus élevé. Soit un coefficient d'écoulement de 0.43. A l'inverse, l'essai N°2 donne la quantité d'eau ruisselé la plus faible (1,534 litres) soit un pourcentage d'écoulement de 4% c-à-d que presque la totalité d'eau de pluie simulée s'est infiltrée dans le sol.

**Tableau 6.** Volumes écoulés des six simulations

N° de l'essai	Taux d'humidité initiale (%)	Volume ruisselé (L)	Coefficient d'écoulement
1	10.25	17.184	0.429
2	4.6	1.534	0.038
3	7.5	7.658	0.191
4	8.1	11.563	0.289
5	9.57	14.990	0.375
6	8.31	14.123	0.353

- ✓ D'après les résultats (figure 34) obtenus nous constatons une proportionnalité entre le taux d'humidité et le pourcentage de ruissellement où le coefficient de corrélation est de  $R = 0.97$ . Cette linéarité de la relation est expliquée par :
- ✓ La conservation des mêmes conditions expérimentales : pente, intensité...etc
- ✓ Le taux d'humidité influe directement sur le ruissellement

✓ Le ruissellement ne débute qu'après une humidification initiale du sol.



**Figure 34.** Relation entre le taux d'humidité et le pourcentage d'écoulement.

### 6.2.2. Analyse des courbes d'infiltration

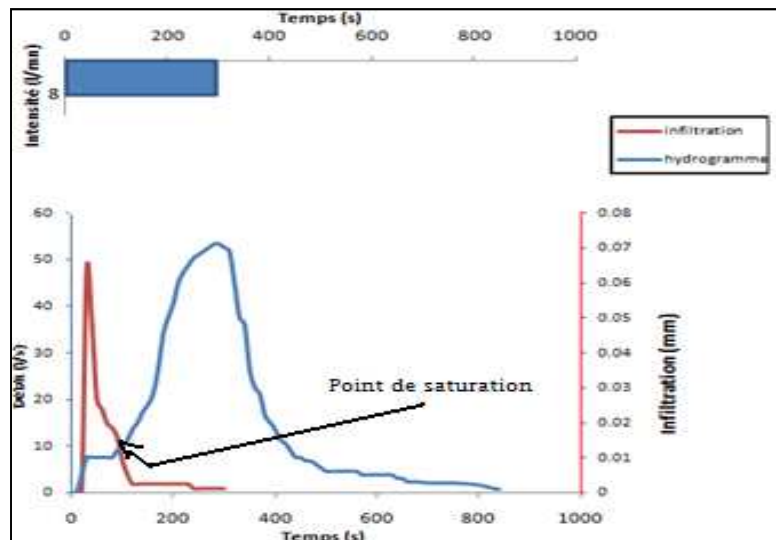
Les mesures de l'infiltration sont effectuées par lecture des tubes piézométriques, durant et après l'averse. Dans le tableau suivant nous représentons le protocole des mesures d'infiltration pendant chaque essai

**Tableau 7.** Protocole des mesures d'infiltration pendant les essais

N° de la mesure	Moment de la mesure (secondes)
1	T <sub>0</sub> (avant l'averse)
2	T=0(début de l'averse)
3	T = 30
4	T = 60
5	T = 90
6	T = 120
7	T = 150
8	T = 180
9	T = 300
10	T = 600
11	T = 1200
12	T = 3600
13	T = 5400

L'infiltration commence dès que l'eau précipitée atteint le sol (figure35). Dans les premiers moments, l'infiltration est maximale puis diminue progressivement après saturation du sol et tend vers une valeur nulle. Le ruissellement ne débute qu'après saturation du sol, de ce fait

nous pouvons dire que le ruissellement représente la pluie nette. Le point d'intersection des 2 courbes représente le point de saturation du sol.



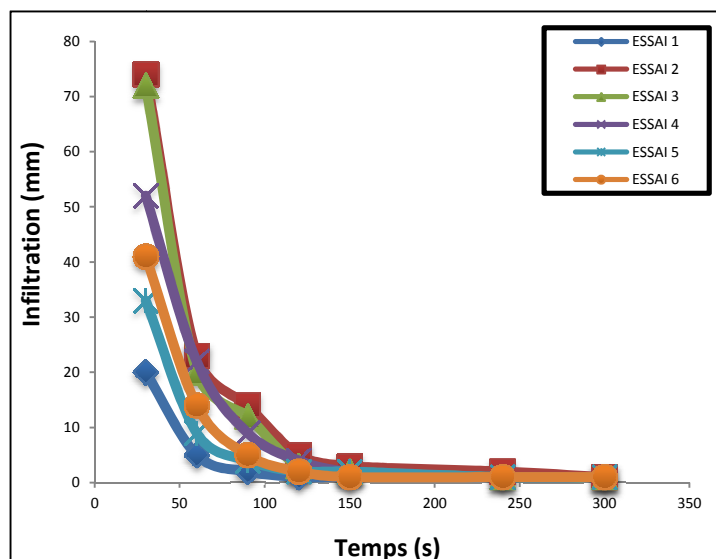
**Figure 35.** Représentation du débit et l'infiltration de l'essai n°1.

Les courbes d'infiltrations de la figure 36 ci-dessous, montrent la concordance des résultats de l'infiltration avec ceux des hydrogrammes. Durant les premiers instants du début de la simulation, l'infiltration est très importante par opposition au ruissellement. Pour les 100 premières secondes, la diminution du taux d'infiltration est importante, ensuite elle se stabilise jusqu'à la fin de l'essai.

Pour ces premiers essais, les hydrogrammes de crue ont le même temps de montée quelque soit l'humidité initiale ( $t_m = 300$  s). Nous pensons que les conditions expérimentales sont à l'origine de ce résultat. Toutes les conditions expérimentales étant par ailleurs égales à l'exception du taux d'humidité initiale. La phase montée du processus est simplement décalée dans le temps. Ces résultats confirment l'influence de l'état d'humidité antécédente sur la réponse hydrologique. On peut interpréter ce phénomène par l'expression de (Ramser 1927) qui a décrit le maximum ainsi :

« Quelle que soit la superficie du bassin versant, le taux maximum de ruissellement, correspondant à une pluie d'intensité donnée, se produit lorsque tous les points du bassin contribuent à l'écoulement. Le point le plus près de l'exutoire ».





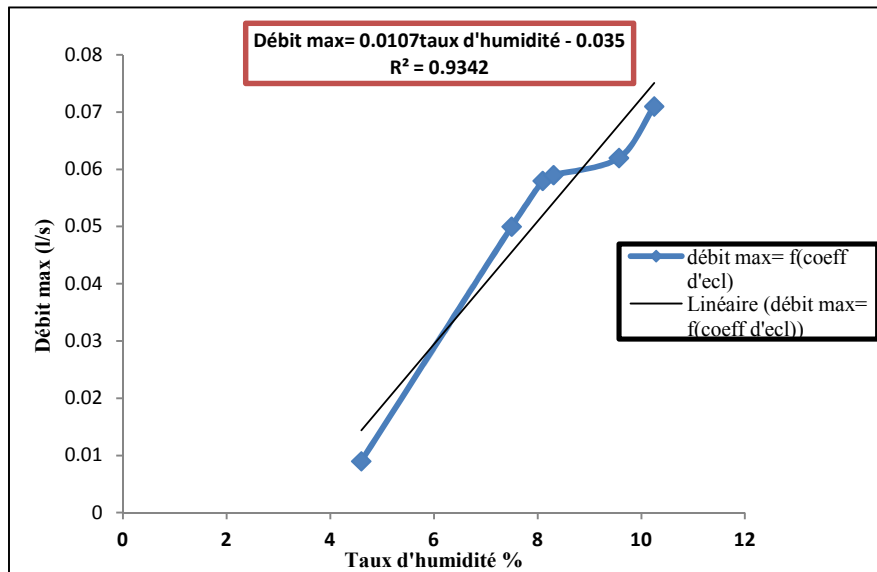
**Figure 36.** Infiltrabilité du sol dans les six premiers essais au niveau du piézomètre N°6 .

Nous nous sommes intéressés à étudier la relation qui peut exister entre le taux d'humidité initial et la valeur maximale du débit de ruissellement. Le résultat est donné en figure 37.

**Tableau 8.** Influence de l'état d'humidité antécédente sur le débit maximal

N° d'Essai	Pluie (l/min)	Humidité initiale(%)	Débit max (l/s)
1	8	10,25	0,071
2	8	4,6	0,009
3	8	7,5	0,05
4	8	8,1	0,058
5	8	9,57	0,062
6	8	8,31	0,059

D'après la figure 37 ci-dessous, la relation  $Q_{\max}$  en fonction du taux d'humidité initiale est une fonction linéaire avec un coefficient de corrélation R de 0.89. Ce résultat est semblable à celui trouvé en figure 34.



**Figure 37.** Relations entre débit maximal et taux d'humidité des essais effectués.

Au delà de l'instant de l'arrêt de pluie nous remarquons une diminution au niveau des valeurs du débit qui décroît progressivement ; il s'agit de la phase de vidange et il est à retenir que les six hydrogrammes sont confondus durant cette phase. On peut interpréter ce phénomène par la définition proposée par Horner et Flynt (1936) et Barnes (1939) :

« La courbe de décrue complète l'hydrogramme. Elle peut ou non tendre vers un débit nul selon les quantités de l'écoulement de base ou de l'écoulement souterrain. Elle représente le prélèvement de l'eau des zones de l'emmagasinement après l'arrêt de la pluie excédentaire. On peut donc considérer que cette partie de l'hydrogramme décrit la diminution naturelle du débit, produite par le drainage de surface. La forme de la courbe ne dépend pas des variations de la précipitation et de l'infiltration avec le temps, elle est essentiellement liée aux caractéristiques physiques du cours d'eau lui-même (exutoire). Chaque instant la diminution de ces réserves se partage entre ruissellement et infiltration. »

Les courbes commencent à tendre asymptotiquement vers zéro au de la 400<sup>ème</sup> seconde et l'écoulement existant durant cette période provient des eaux hypodermiques. C'est le ressuyage. Sur les hydrogrammes de la figure 33, cette diminution d'eau dans les tubes piézométriques est visible au delà de la 360<sup>ème</sup> seconde.

## Conclusion

Les essais exposés précédemment ont été utiles pour montrer deux buts, le premier est la vérification du bon fonctionnement du matériels utilisé et le second consiste à l'étude de l'influence de l'humidité antécédentes du sol et à ce propos nous pouvons conclure que l'humidité initiale du sol influe sur :

- La forme de l'hydrogramme (crue, maximum)
- L'allure de l'hydrogramme (exp : aplatissement)
- Volume ruisselé
- L'infiltrabilité du sol

### 6.3. Essais de simulation

Ces essais ont été conduits dans le but de mettre en évidence l'influence de certains facteurs intervenants sur la réponse hydrologique à savoir : l'influence des conditions initiales d'humidité du sol, l'influence de la pente, l'influence de l'intensité de la pluie, l'influence du couvert végétal. Les résultats sont présentés comme suit :

#### 6.3.1. Influence de la pente sur la réponse hydrologique :

Proposons-nous de déterminer l'influence de la pente sur le comportement hydrologique du bassin expérimental, suite à une averse uniforme d'intensité constante. Nous avons admis en outre pour simplifier, qu'au commencement de la pluie, le débit de base était nul. De plus le sol était nu.

**Tableau 9.** Conditions expérimentales et variables mises en jeu  
Pour démontrer l'influence de la pente

Cas étudié		N° d'essai	Condition d'expérimentation			
			Pente (%)	Etat d'humidité	Couvert végétal(%)	Intensité (l/mn)
Faible intensité	I	8	0	Humide	0	8
		19	2	Humide	0	8
		16	4	Humide	0	8
	II	7	0	Très humide	0	8
		20	2	Très humide	0	8
		17	4	Très humide	0	8
	III	2	0	Sec	0	8
		18	2	Sec	0	8
		15	4	Sec	0	8
Forte intensité	I	11	0	Humide	0	14
		40	2	Humide	0	14
		13	4	Humide	0	14
	II	10	0	Très humide	0	14
		41	2	Très humide	0	14
		14	4	Très humide	0	14
	III	9	0	Sec	0	14
		39	2	Sec	0	14
		12	4	Sec	0	14

L'analyse a été faite pour deux cas de figure :

- **Cas d'une faible intensité pluviométrique**
- **Cas d'une forte intensité pluviométrique**

### 6.3.1.1. Cas d'une faible intensité pluviométrique

Dans des conditions d'humidités initiales différentes du sol (très humide, humide et sec) et sous une pluie simulée dont l'intensité est de 8 l/mn, nous avons réalisé des essais mis en place sur trois pentes différentes : 0%,2% et 4%.

#### 6.3.1.1.1. Analyse des hydrogrammes

Les hydrogrammes représentés à la figure 38 ci-dessous, montrent des différences claires des points de vue forme et caractérisation. Lors des simulations, l'apparition du ruissellement dans les trois cas d'humidité se produit plus rapidement pour le cas d'une pente nulle, en comparant aux hydrogrammes résultants sous les pentes 2% et 4%, par exemple dans le cas

du sol sec le ruissellement apparaisse après 200 sec du début de la pluie dans l'essai N° 2 (Pente =0%), 240 sec pour l'essai N°18 (Pente =2%) et 220 sec pour l'essai N°15. Ceci est dû à la mauvaise mise en place du sol sur la veine d'essai et à la nature mobilisable du sable (contrainte expérimentale), qui se déplace facilement vers l'aval de la veine d'essai sous l'effet de la pente et constitue par conséquent un obstacle dans la partie aval de la veine d'essai qui bouche précisément la plaque – déversoir (élément n°4 dans la figure 28). Nous avons observé pour chaque cas d'humidité les faits suivants :

- Cas du sol sec

La concavité dans le cas de la pente 2% et 4% est présente discrètement et le maximum se présente sous forme de petit palier dû à la présence des vides incomplètement remplis lorsque le ruissellement s'est déclenché. Par contre dans l'hydrogramme de la pente 0% les concavités sont absentes et le maximum est accentué à cause de la saturation du sol.

- Cas du sol moyennement humide

Ces essais sont réalisés sur un sol moyennement humide. Nous marquons des concavités du à la non saturation du sol dans la montée des trois hydrogrammes, qui se finissent par un maximum dont la forme est celui d'un palier. Ceci peut être expliqué par l'effet de l'obstacle constitué par le sable utilisé dont on a parlé précédemment, qui gêne le ruissellement dans les cas des pentes 2% et 4% où le débit maximal  $Q_{\max}$  de l'essai N°8 (pente 0%) est de 0.033 l/s, strictement supérieur aux débits maximum des essais N°19 (pente 2%;  $Q_{\max} = 0.02$  l/s) et N°16 (pentes 4%;  $Q_{\max} = 0.017$  l/s) .

- Cas du sol très humide

Les concavités sont présente dans les essais (N°20 ; pente 2%) et (N°17 ; pente 4%) mais elles sont totalement absente dans l'essai (N°7 ; pente 0%). Les débits maximums dans ce cas ont la forme d'un palier qui s'élargit en augmentant la pente. Les courbes de décrue sont confondues pour les trois cas qui sont assez rapide dans les cas réalisés sur les pentes 2% et 4%, c'est la vidange. Au-delà du 400<sup>ème</sup> sec, les courbes commencent à tendre asymptotiquement vers zéro. Au de la 400<sup>ème</sup> seconde et l'écoulement existant durant cette période provient des eaux hypodermiques.

### **6.3.1.1.2. Analyse des courbes d'infiltration**

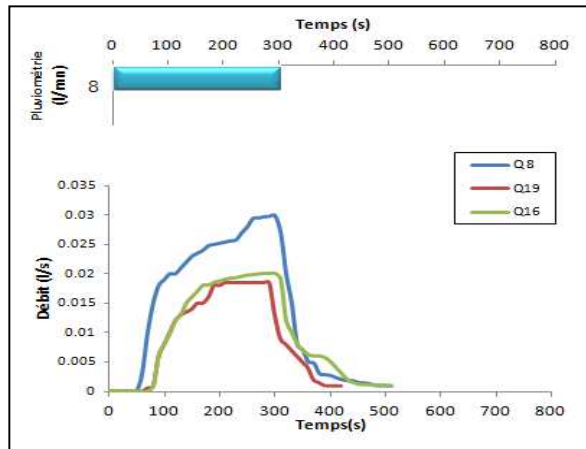
D'après les courbes d'infiltration résultantes, représentés à la figure (39) ci-dessus, nous apportons les constats suivants :

- Cas du sol sec

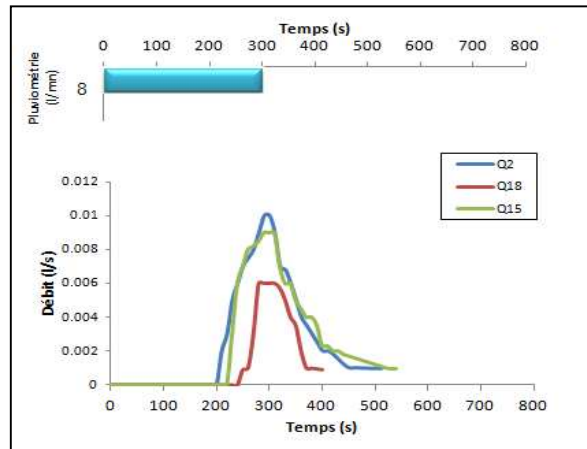
L'infiltration est maximal au début de la précipitation pour les trois essais .dans l'essai N° 2 (pente 0%), l'infiltration est immédiate et le maximum est de 28 mm, mais dans les essais (N°18 ; pente 2%) et (N°15 ; pente 4%) les infiltrations maximales sont respectivement 10 mm et 6 mm. Dans ce cas la phase de ressuyage est totalement absente car l'eau infiltré dans le sol est retenue per ce dernier c'est une eau de rétention.

- Cas du sol moyennement humide

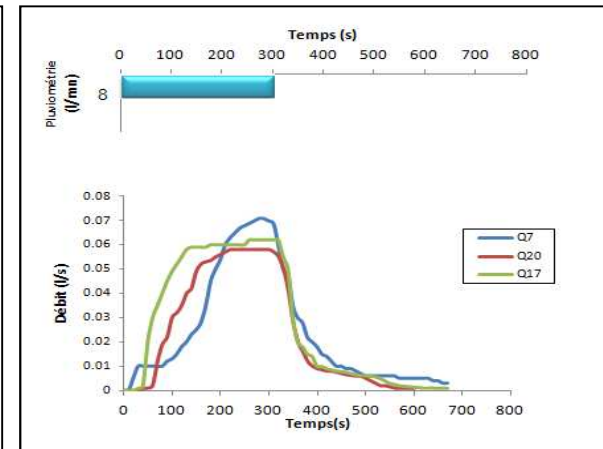
La plus forte valeur d'infiltration est marqué dans l'essai (N°19 ; pente 2%) est de 20 mm. L'infiltration maximal de l'essai (N°16 ; pente 4%) est supérieure a celle de l'essai (N°17 ; pente 0%). Ceci est du a la migration des particules de sable utilisés sous l'effet de la pente en construisant un obstacle au niveau de la plaque -déversoir (élément N°4 dans la figure 31) qui gêne l'écoulement des eaux et évidemment la majorité de cette dernière se stocke dans la veine d'essai. Le ressuyage existe dans ce cas en raison de sa forte humidité initiale donc l'eau infiltré dans la porosité du sol est une eau libre. Cette phase a duré longtemps dans l'essai de la pente 2% par rapport aux essais de la pente 0% et 4%.



1. hydrogramme résultants sous sol sec

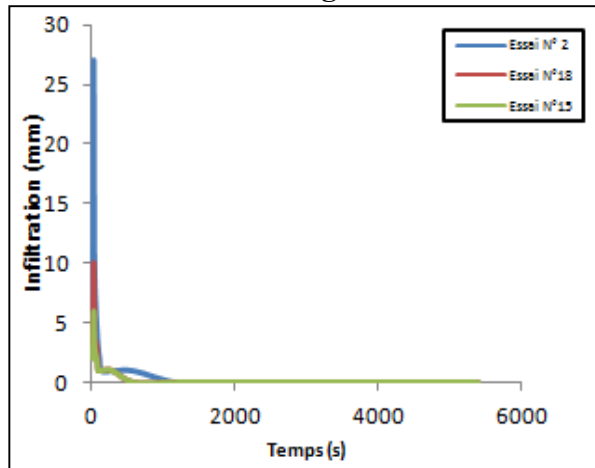


2. hydrogramme résultants sous sol humide

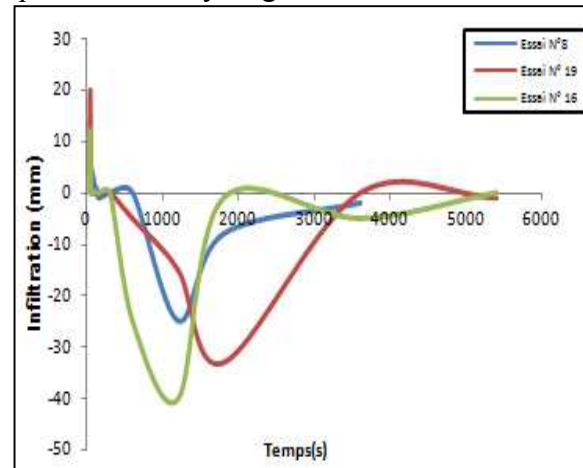


3. hydrogramme résultants sous sol très humide

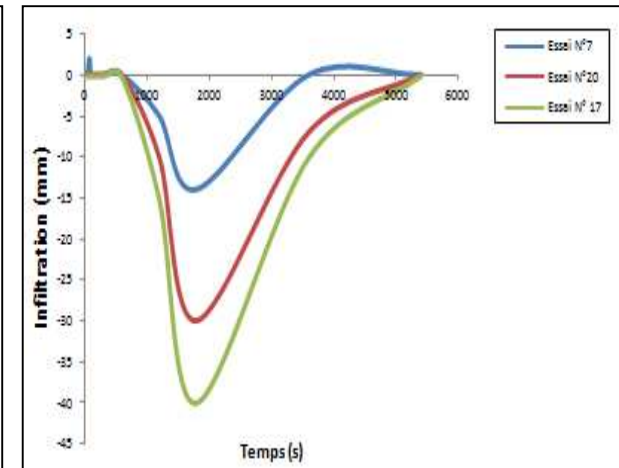
**Figure 38.** Influence de la pente sur les hydrogrammes de crue résultants sous une intensité de 8l/mn.



1. Relevé du piézomètre N°20



2. Relevé du piézomètre N° 9



3. Relevé du piézomètre N°4

**Figure 39.** Influence de la pente sur la variation de la charge d'eau au niveau des piézomètres sous une intensité de 8l/mn

- Cas du sol très humide

Dans ce cas, l'infiltration maximale est très faible dans les trois essais elle est de 2 mm dans l'essai (N°7 ; pente 0%) et nulle dans les essais (N°20 ; pente 2%) et (N°17 ; pente 4%) se qui indique la saturation du sol. Mais ce qui est à remarquer est la phase de ressuyage qui est assez lente dans le cas de la pente 4% comparativement aux deux autres cas.

D'après G. Rémériéras 1986 : « pour une même pluie homogène la quantité d'eau reçue par une surface inclinée sera différente de celle qu'aurait interceptée la projection horizontale de la dite surface ».

### **6.3.1.2. Cas d'une forte intensité pluviométrique**

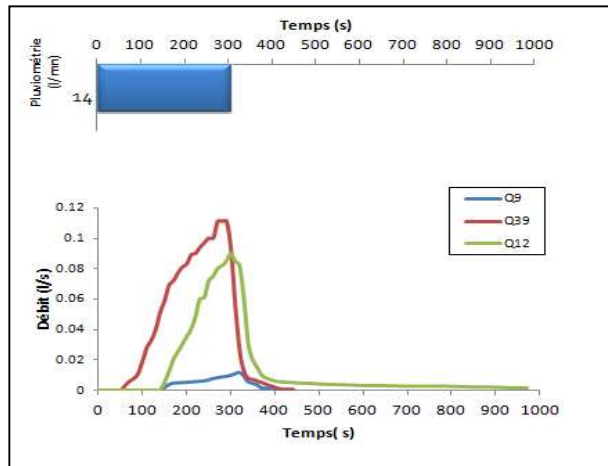
Dans des conditions d'humidités initiales différentes du sol (très humide, humide et sec) et sous une pluie simulée dont l'intensité est de 14 l/mn, nous avons réalisé des essais mis en place sur trois pentes différentes : 0%,2% et 4%.

#### **6.3.1.2.1. Analyse des hydrogrammes**

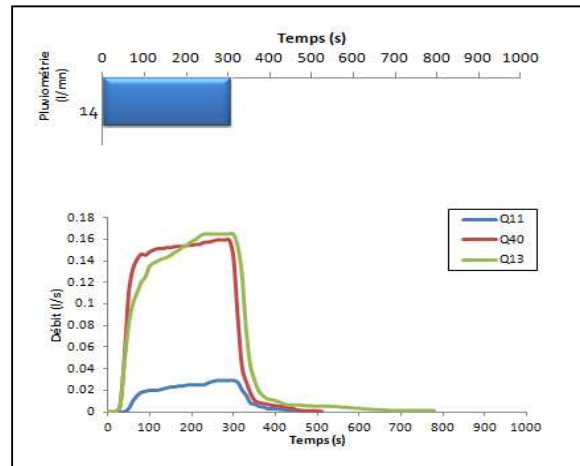
La figure 40 montre les hydrogrammes de ruissellement qui ont été observés pour trois différentes pentes, dans le cas d'un sol initialement sec et dans le cas d'un sol maintenu à une certaine humidité avant la simulation. Pour une intensité double du cas précédent (14 l/min) la réponse hydrologique est largement influencée par la pente du bassin. De plus les volumes ruisselés augmentent avec la pente. L'apparition du ruissellement est très rapide dans le cas d'un sol humide, comparativement au cas d'un sol initialement sec.

Dans le cas du sol initialement sec, et pour une pente de 4%, le début de ruissellement s'effectue 60 s après le commencement de la chute de pluie, alors qu'il est de 150 s pour une pente de 0 %. Sur la figure (40), on observe un ruissellement beaucoup plus rapide ou on peut dire immédiate sur le sol de forte humidité. Ce délai de réponse est raccourci en raison de l'humidité initiale et de l'apport de la pluie. La forme des hydrogrammes est différente pour les deux situations. Pour le sol sec, ceux-ci sont très aigus en particulier pour les pentes 2 et 4 %. Pour le cas de forte humidité on observe un palier au niveau du maximum du débit moins prononcé pour la plus forte pente. Les décrues sont très raides et faiblement distinctes les unes des autres. La phase de ressuyage ou de vidange est également très marquée.

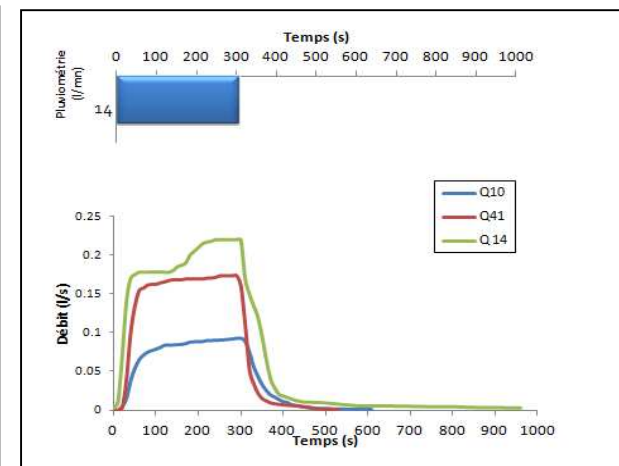




1. Hydrogrammes résultant sous sol très humide

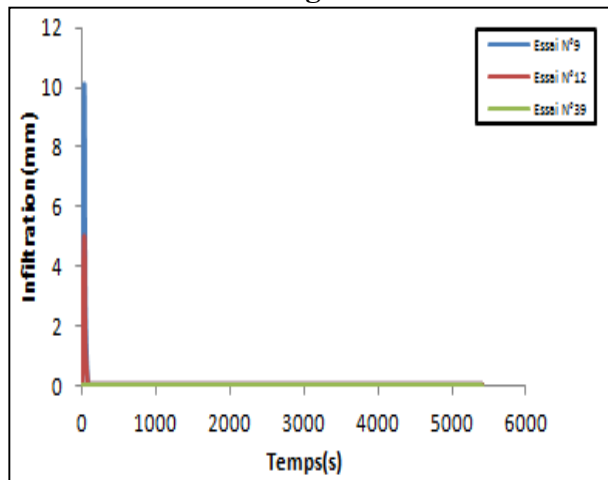


2. Hydrogrammes résultants sous sol sec

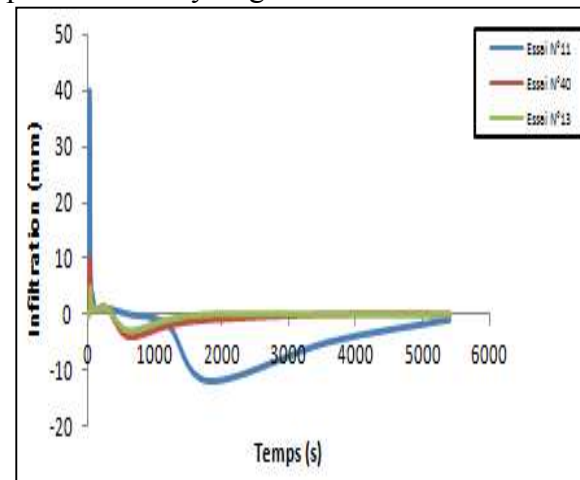


3. Hydrogrammes résultants sous sol humide

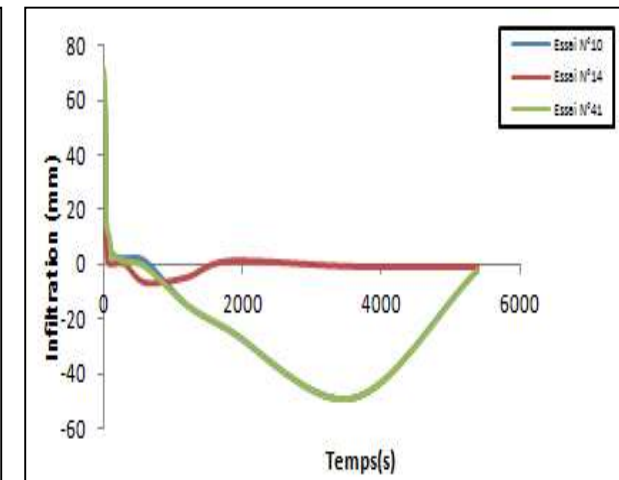
**Figure 40.** Influence de la pente sur les hydrogrammes de crue résultants sous une intensité de 14l/mn.



1. relevé du piezomètre N°15



2. relevé du piezomètre N°4



3. relevé du piezomètre N°19

**Figure 41.** Influence de la pente sur la variation de la charge d'eau au niveau des piézomètres sous une intensité de 14 l/mn

### 6.3.1.2.2. Analyse des courbes d'infiltration

On observant les résultats représentés dans la figure (41) on remarque que l'infiltration est de même influencé par la pente dès le début du phénomène où l'infiltration maximale dans les essais effectués pour la même humidité initiale mais sous différentes pentes est absolument pas la même : exemple du sol sec (voir Tableau (10)).

**Tableau 10.** Variations de l'infiltration maximale du sol sec en fonction de la pente

N° D'essai	Infiltration maximale (mm)	La pente correspondante(%)
9	10	0
12	5	2
39	0	4

L'infiltrabilité du sol pour les très cas représentés dans la figure ci-dessus, marque une diminution progressive après avoir marqué le maximum jusqu'à une valeur nulle pendant la chute de pluie c'est la saturation du sol. Dès que la pluie cesse l'infiltrabilité est négative pendant cette phase c'est la vidange d'eau stocké dans le sol. Cette vidange est absente dans le cas du sol sec car l'eau existante dans le sol est une eau de rétention par contre elle est très remarquable dans le cas du sol très humide par exemple l'essai (N° 41 ; pente 4%) l'infiltrabilité est de -50 mm.

D'après ces résultats nous pouvons dire que la phase d'imbibition, est influencée par le fait de la pente qui favorise le ruissellement et diminue proportionnellement l'infiltration.

On peut percevoir, que ces résultats sont dus à un effet combiné de deux facteurs : la pente et la forte intensité pluviométrique. La première favorise le ruissellement qui diminue l'opportunité de pénétration de l'eau dans le sol et la deuxième a un effet inhibiteur par la forte énergie cinétique des gouttes d'eau qui limite la capacité d'imbibition de l'eau dans le sol. Ce dernier effet est l'objet de l'analyse suivante.

## **CONCLUSION**

La pente du terrain influe sur :

- Le volume ruisselé
- Le taux d'infiltrabilité du sol

### 6.3.2. Influence de l'intensité pluviométrique sur la réponse hydrologique

L'analyse portera sur les simulations représentées au tableau 11 donné ci-dessous. L'intensité pluviométrique était doublée pour chaque cas étudié. L'influence des variations d'intensité de l'averse sur l'allure de l'hydrogramme résultant ainsi que les courbes des infiltrations sont illustrée respectivement dans les figures ci dessous.

**Tableau 11.** Conditions expérimentales et variables mises en jeu pour démontrer l'influence de l'intensité pluviométrique

N° d'essai	Conditions expérimentales			
	Intensité (l/mn)	Pente (%)	Etat d'humidité du sol	Couvert végétal (%)
7	8	0	Très humide	0
10	14	0	Très humide	0
18	8	2	Sec	0
39	14	2	Sec	0
15	8	4	Sec	0
12	14	4	Sec	0
8	8	0	Humide	0
11	14	0	Humide	0
19	8	2	Humide	0
40	14	2	Humide	0
16	8	4	Humide	0
13	14	4	Humide	0
2	8	0	Sec	0
9	14	0	Sec	0
20	8	2	Très humide	0
41	14	2	Très humide	0
17	8	4	Très humide	0
14	14	4	Très humide	0

### 6.3.2.1. Analyse des hydrogrammes

La réponse du bassin est immédiate dans les essais où l'intensité est de 14 l/mn (forte intensité), Par exemple elle a duré moins de 10 secondes dans l'essai N°10, l'essai N° 41 et l'essai N° 13. Par contre elle est très lente dans les essais effectués sous faible intensité (8 l/mn), elle a duré 250 s dans l'essai N° 15 et N° 18 c'est la phase d'imbibition (figure 42). Les hydrogrammes de crue des essais soumis à la forte intensité sont caractérisés par un temps de montée très court ( $t_m = 60\text{sec}$  dans l'essai N°14) comparativement aux essais effectués sous faible intensité ( $t_m = 300\text{sec}$  dans l'essai N°12). Ces courbes de montée se

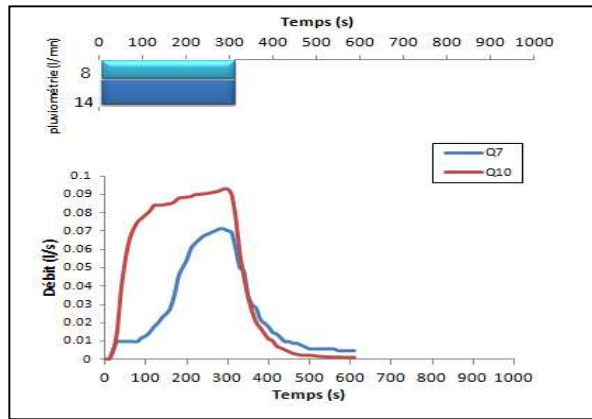
finalisent par le débit maximal qui se présente soit par un pic (cas du sol sec) suite à la non saturation des vides du sol, soit par un palier qui s'élargit en fonction de l'humidité initiale du sol (figure 43).

Du point de vue quantité et à titre de comparaison, l'amplitude du débit (approximativement le double) influence sur la réponse du bassin de façon remarquable. Particulièrement les débits maximaux ( $Q_{\max}=0.015$  l/s pour l'essai N°19 et  $Q_{\max}=0.15$  l/s pour l'essai N°40) nous permettent de dire que le débit maximal dû à l'intensité 14 l/mn est estimé à dix fois le débit maximal généré par l'intensité de 8 l/mn. La décrue est immédiate dans les deux cas (forte et faible intensité) et ce, 20 sec après la chute de pluie. La phase de vidange est assez prolongée dans le temps pour les essais effectués sous l'intensité 14 l/mn (figure 44).

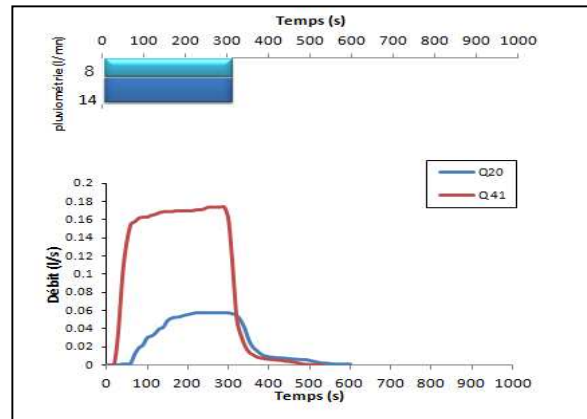
### **6.3.2.2. Analyse des courbes d'infiltration**

Les courbes d'infiltration résultantes de figure 46,47 et 48 correspondantes aux essais N°41, N°11, N° 39 indiquent une très faible infiltrabilité du sol à cause de la forte énergie cinétique des gouttes d'eaux. Autrement le résultat de l'impact des gouttes de pluie sur le sol est la formation d'une couche superficielle, mince, continue et compacte colmatant tous les interstices du sol. Par conséquent la vitesse d'imbibition d'eau dans le sol est inférieure à la vitesse de ruissellement : c'est ce que l'on l'appelle écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (voir figure 45-a). En revanche, la faible énergie cinétique des gouttes d'eau facilite l'infiltration des eaux précipitées (la capacité d'infiltration est supérieure à l'intensité pluviométrique) par exemple le couple des essais N°41 et N°20.

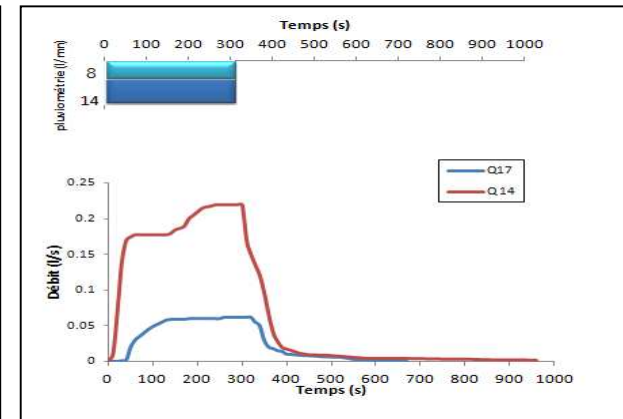
Dans les essais où le sol est initialement sec et soumis à une faible intensité, nous observons la formation de certaines fissurations en surface qui favorisent l'infiltration (Voir figure 45-b).



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

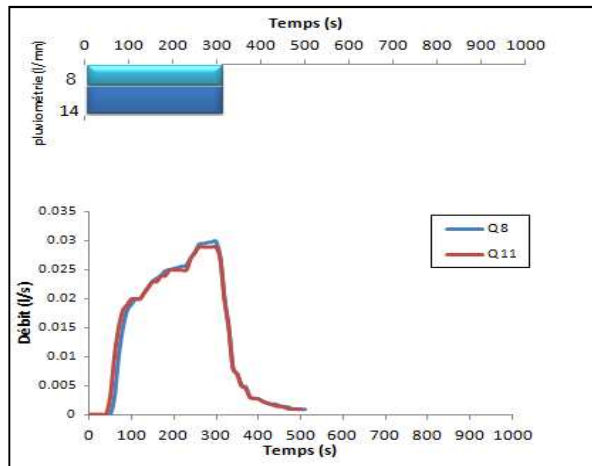


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

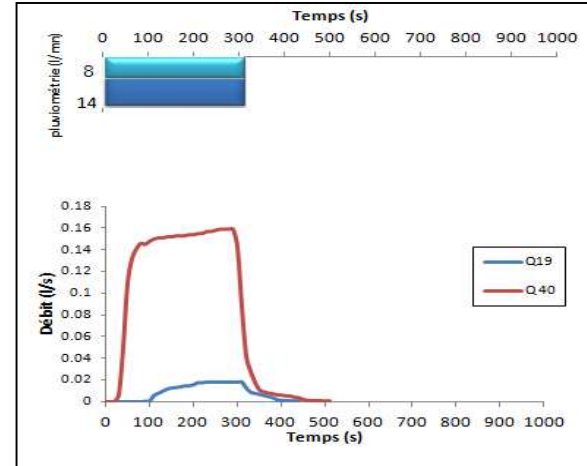


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

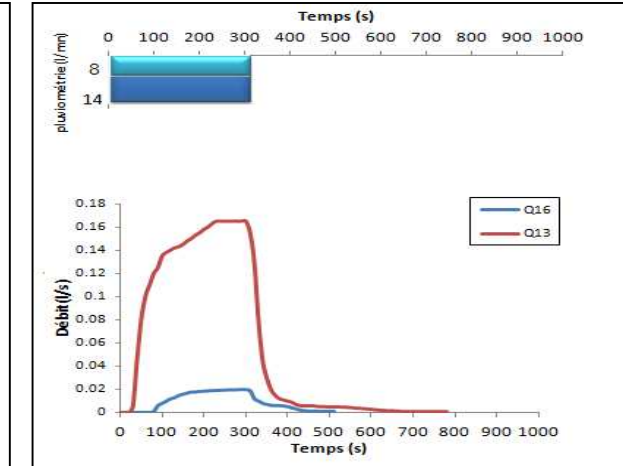
**Figure 42.** Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes (0%, 2% et 4%) pour un sol initialement très humide



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

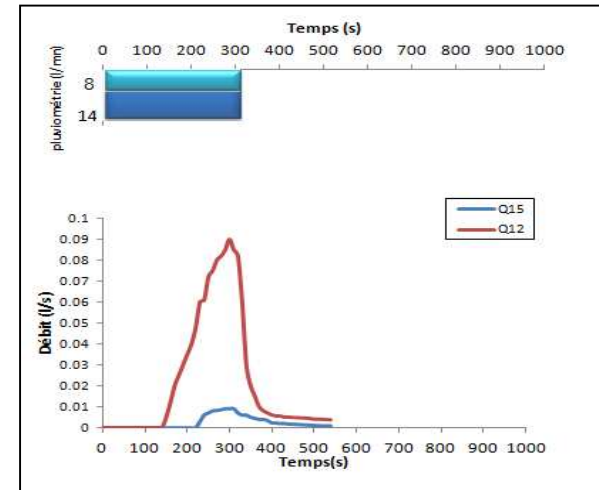
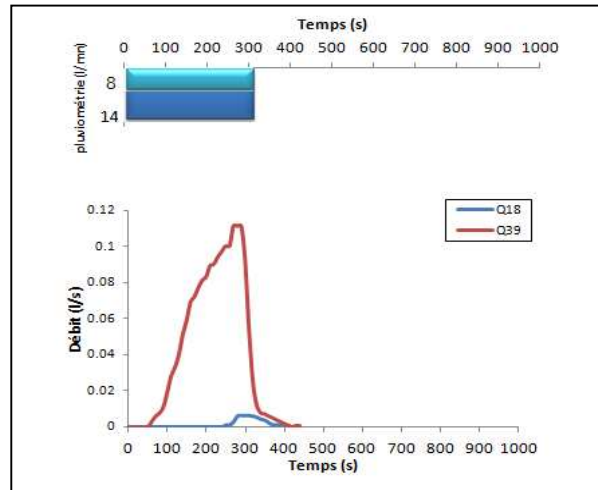
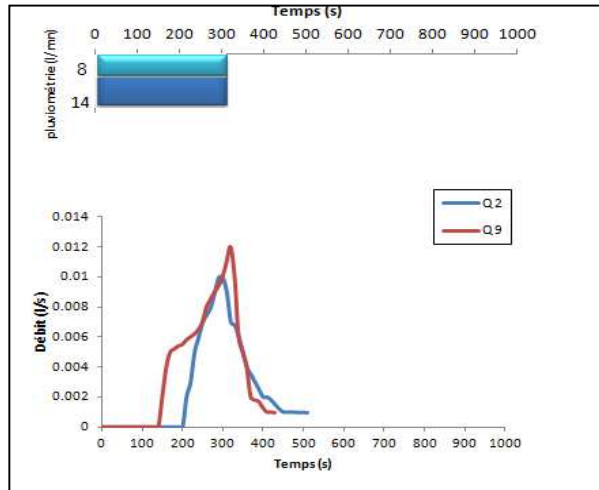


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%



3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

**Figure 43.** Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes (0% ,2% et 4%) sous sol initialement humide



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

**Figure 44 :** Hydrogrammes de crue résultants pour différentes pentes (0%, 2% et 4%) pour un sol initialement sec

Dans tous les cas étudiés, dès que la pluie cesse, la décrue commence immédiatement et l'infiltration correspondante tend vers des valeurs négatives, c'est la vidange des eaux de surface qui dure au maximum 100s et au delà de 400s l'écoulement enregistré est causé par les eaux hypodermiques : c'est le ressuyage. La décroissance de la charge d'eau au niveau des piézomètres est expliquée par un flux latéral des ces eaux par. Pendant cette période l'effet de l'intensité de la pluie n'est pas évident.

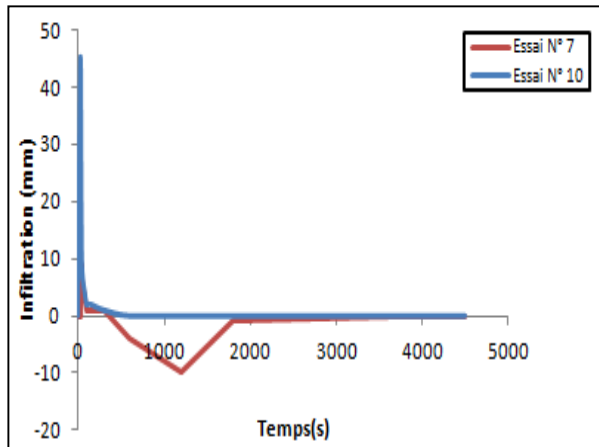
Pendant la crue, nous marquons l'absence de l'infiltration dans tous les essais effectués sous l'intensité double 14 l /mn. Donc la majeure partie des eaux précipitées ruisselle et ce qui reste est retenue en surface (eau de rétention). D'après les résultats des essais réalisés sous l'intensité 8 l/mn, les eaux de pluies se partagent entre ruissellement et infiltration.

L'expression suivante de Lafforgue (1977) confirme nos interprétations : Selon l'intensité de la pluie, l'eau peut, soit s'infiltrer dans le sol, soit s'accumuler et s'écouler sous forme de ruissellement de surface. Si, l'intensité de l'averse est inférieure aux taux d'infiltration, les pertes par évaporation et interception étant négligées, toutes l'eau de précipitation pénétration dans le profil du sol. par contre, une intensité d'averse supérieure au taux d'infiltration produira une série de phénomènes qui finalement causeront du ruissellement en surface.

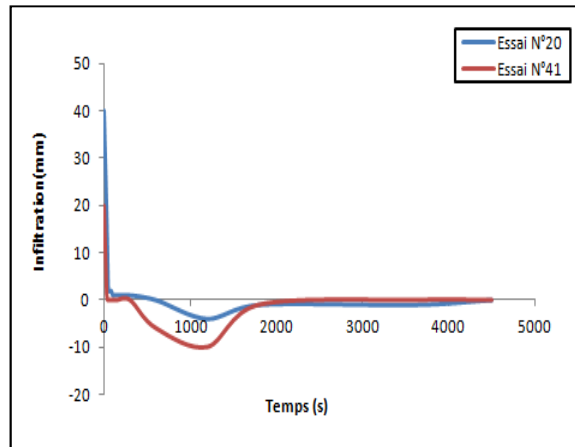


a)  
a) Formation d'une couche superficielle lors des fortes crues  
b) Formation des fissurations au niveau de la surface du sol lors des faibles intensités

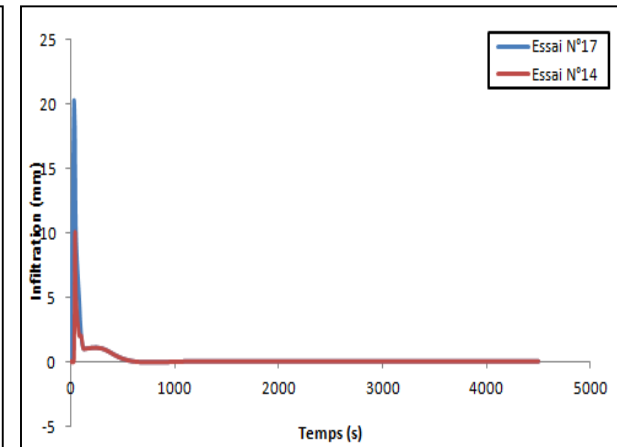
**Figure 45.** Influence de l'intensité pluviométrique sur le comportement hydrologique



1.Relevé du piezomètre n° 2

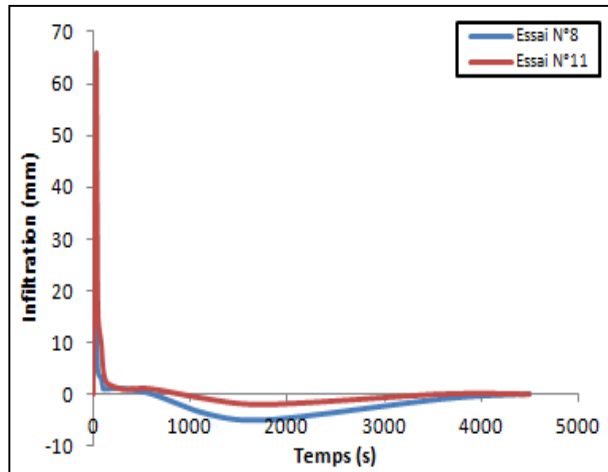


2. Relevé du piezomètre n° 12

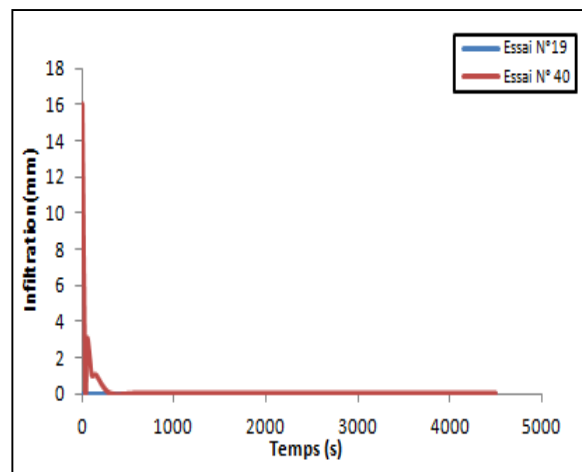


3.Relevé du piezomètre n° 18

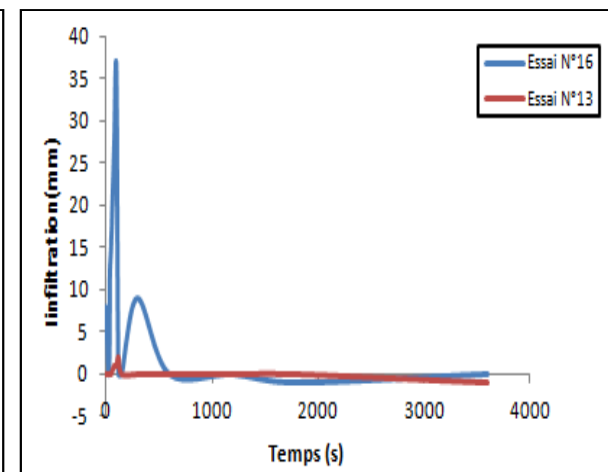
**Figure 46.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide sous différente intensité pluviométrique



1.Relevé du piezomètre n° 1



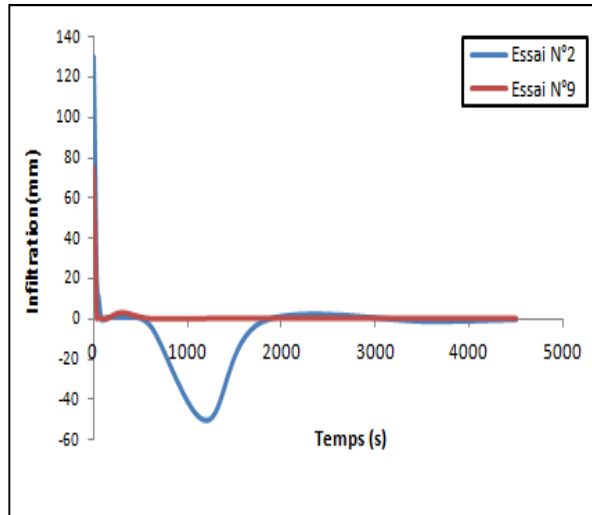
2. Relevé du piezomètre n° 14



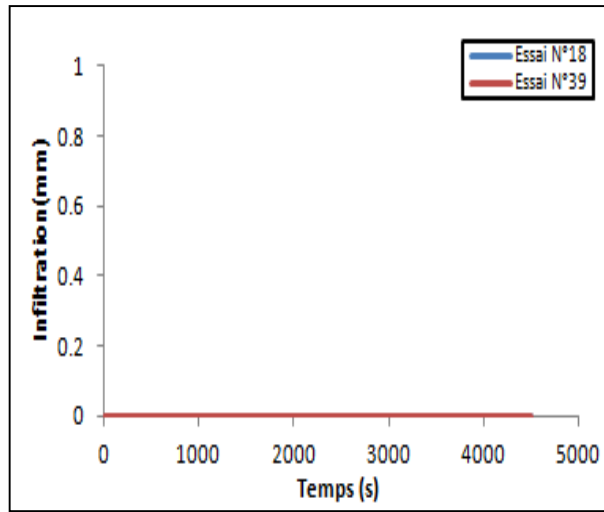
3. Relevé du piezomètre n° 7

**Figure 47.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide sous différentes intensité pluviométrique.

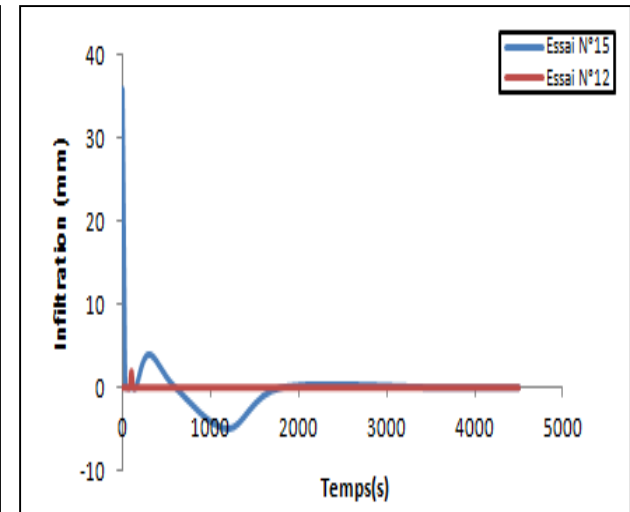




1. Relevé du piézomètre n° 5



2. Relevé du piézomètre n° 18



3. Relevé du piézomètre n° 10

**Figure 48.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec sous différentes intensités pluviométriques.

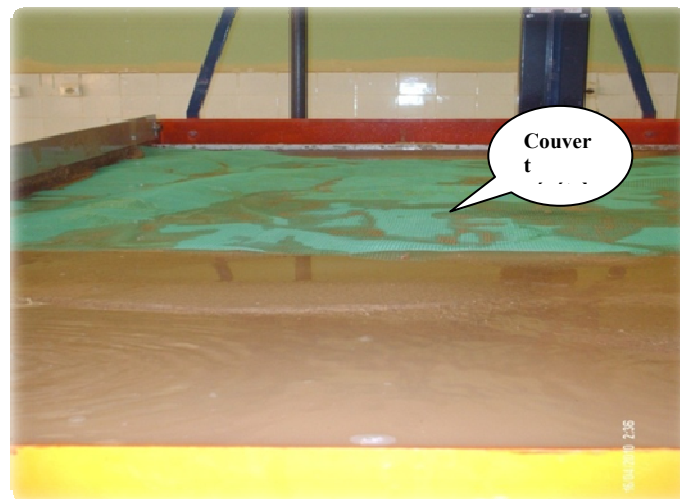
## Conclusion

L'intensité pluviométrique influe sur :

- L'allure de l'hydrogramme
- Le volume ruisselé
- Le taux d'infiltrabilité du sol

### 6.3.3. Influence de la couverture végétale et de la rétention en surface

En mettant en jeu une simulation du couvert végétal constitué d'une matière synthétique, qui couvre 60% de la surface du bassin expérimental dont la largeur est de 1000 mm, la longueur est de 1500 mm, le diamètre de la maille est de 3mm et son épaisseur est de 8mm, placé à l'amont de veine d'essai (figure 49). Nous avons pris la précaution d'adapter les mêmes conditions de conceptualisation des essais, afin que les estimations des débits et les infiltrations sur sol nu et sol couvert soient cohérentes et donc comparables.



**Figure 49.** Simulation du processus de ruissellement sur couvert végétal artificiel

**Tableau 12.** Protocole expérimental pour l'étude du rôle du couvert végétal sur la réponse hydrologique

Intensité	Humidité du sol	N° Des essais misent en comparaison					
		Pente 0%		Pente 2%		Pente 4%	
		Cv=0%	Cv=60%	Cv=0%	Cv=60%	Cv=0%	Cv=60%
8 l/mn	Sol sec	Essai 2	Essai 33	Essai 18	Essai 21	Essai 15	Essai 36
	Sol humide	Essai 8	Essai 34	Essai 19	Essai 22	Essai 16	Essai 37
	Sol très humide	Essai 7	Essai 35	Essai 20	Essai 23	Essai 17	Essai 38
14 l/mn	Sol sec	Essai 10	Essai 32	Essai 39	Essai 24	Essai 12	Essai 27
	Sol humide	Essai 11	Essai 31	Essai 40	Essai 25	Essai 13	-Essai 28
	Sol très humide	Essai 9	Essai 30	Essai 41	Essai 26	Essai 14	Essai 29

### 6.3.3.1. Analyse des hydrogrammes

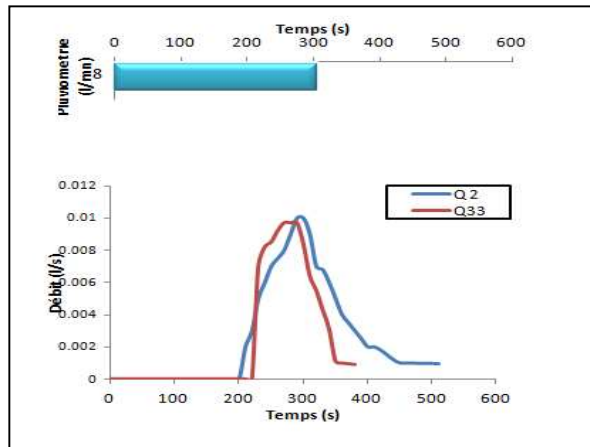
En comparant les hydrogrammes des figures (50 à 55) ci-dessous, des crues résultants des essais effectués sur sol nu et sur sol couvert par une simulation de la végétation, en conservant les mêmes conditions expérimentales (humidité antécédente, pente et intensité pluviométrique) on remarque que la présence du couvert végétal n'influe pas sur l'allure l'hydrogramme, c.-à-d le comportement hydrologique général du bassin est la même pour les deux cas de sol quelque soit les conditions expérimentales (la crue, débit max (pic ou palier) et la décrue), mais de point de vue quantitatif nous marquons au cours des différentes phases :

- Un décalage entre les courbes des différents cas étudiés, exemple : un décalage de 100s entre les hydrogrammes du sol nu et sol couvert entre l'essai N° 15 et l'essai N° 36.
- Une diminution du taux de ruissellement et par conséquent le maximum par exemple dans l'essai n°17 le débit max est de 0.11 L/s et dans l'essai n° 38 le débit max est de 0.06/s ce qui implique une rétention de  $\approx 1/2$  du débit maximum.

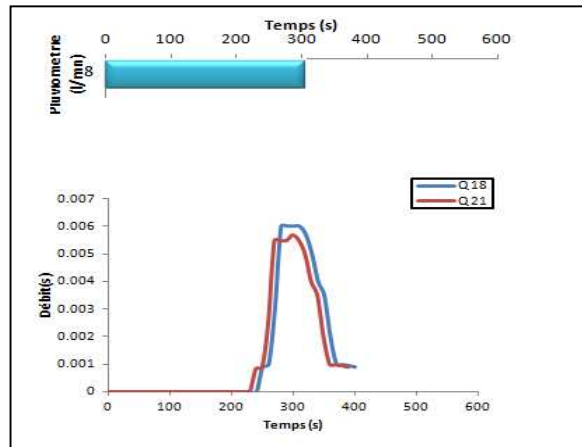
### 6.3.3.2. Analyse des courbes d'infiltration

Les courbes d'infiltrabilité résultants des essais effectués sur sol nu et sur sol couvert (figures 57 à 62) sont très semblables, de ce fait on remarque que la présence du couvert végétal n'influe pas aussi sur l'allure générale des courbes d'infiltrabilité (imbibition, stockage et vidange), mais de point de vue quantitatif nous marquons au cours des différentes phases :

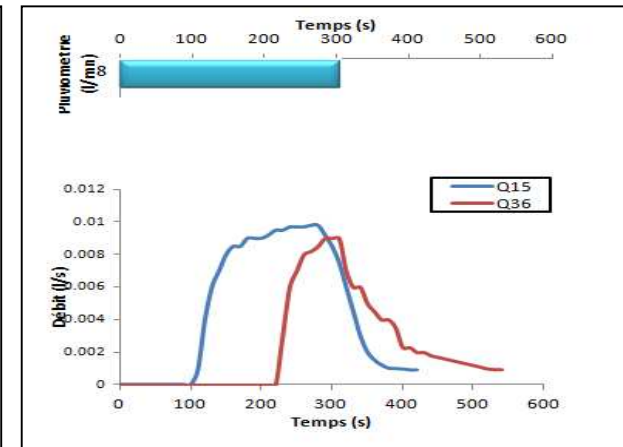
- Diminution de la hauteur initialement infiltré par exemple sur sol nu elle était de 19 mm dans l'essai n°12 et sur sol couvert était de 13 mm dans l'essai n°27 ce qui implique une rétention de 6 mm par la végétation utilisé.
- Des études ont montré que, suivant le couvert végétal, 1 à 10 mm d'eau sont interceptés par la végétation au cours d'un événement pluvieux (Chapman, 1989).
- Diminution du taux d'infiltrabilité au niveau des différentes phases, surtout pendant la vidange



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

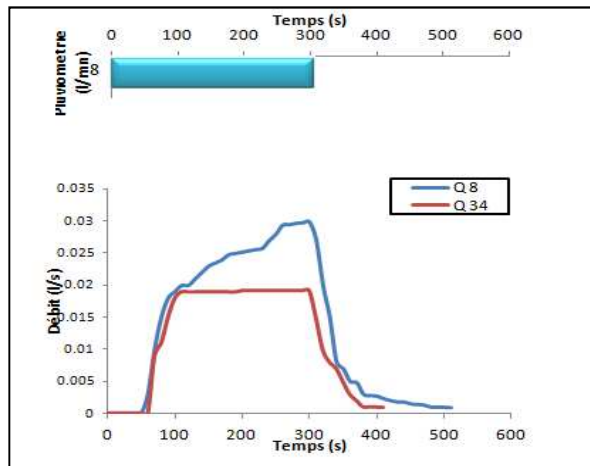


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

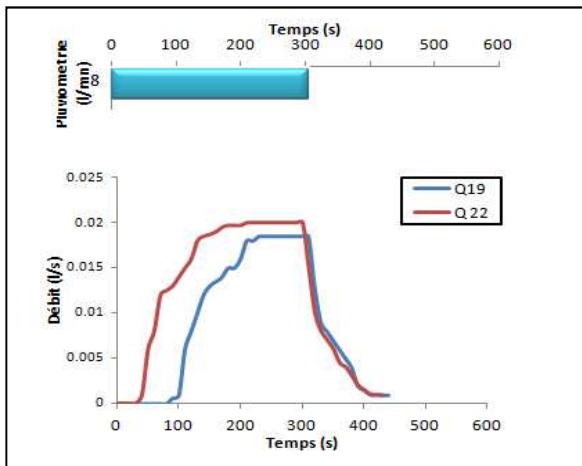


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

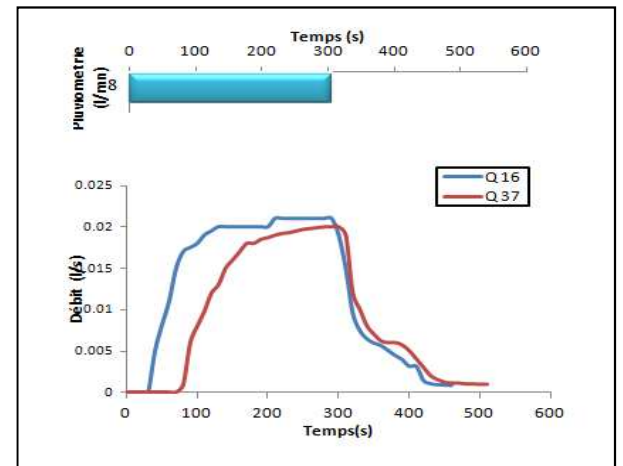
**Figure 50.** Hydrogrammes résultants pour un sol initialement sec (intensité 8 l/mn pentes 0 – 2 – 4 %).



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

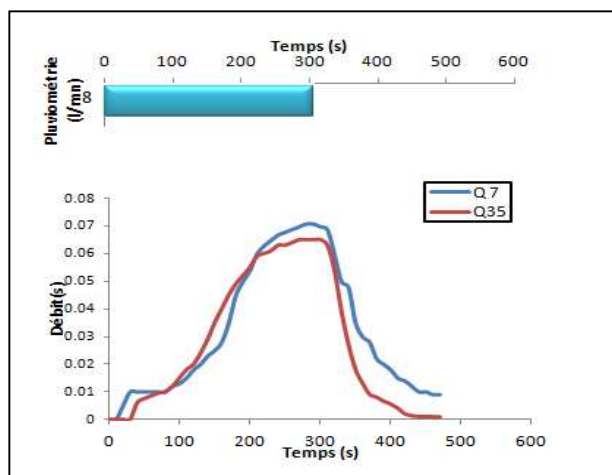


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

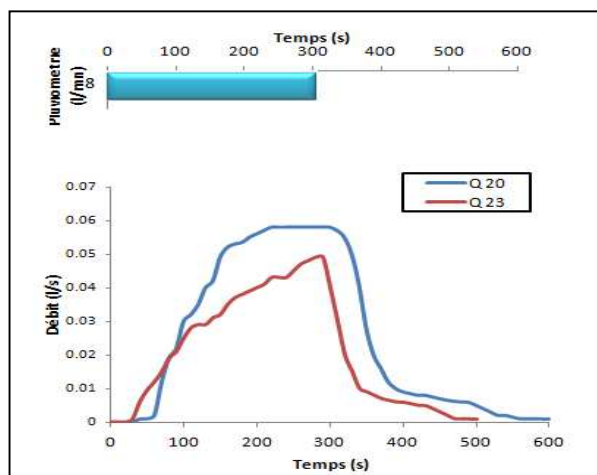


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

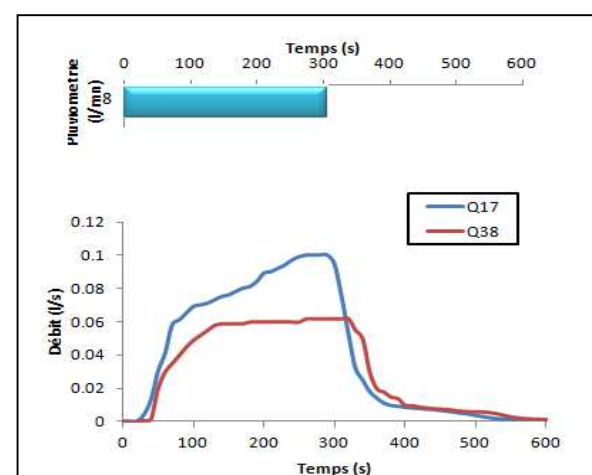
**Figure 51.** Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement humide (intensité 8 l/mn pentes 0 – 2 – 4 %).



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

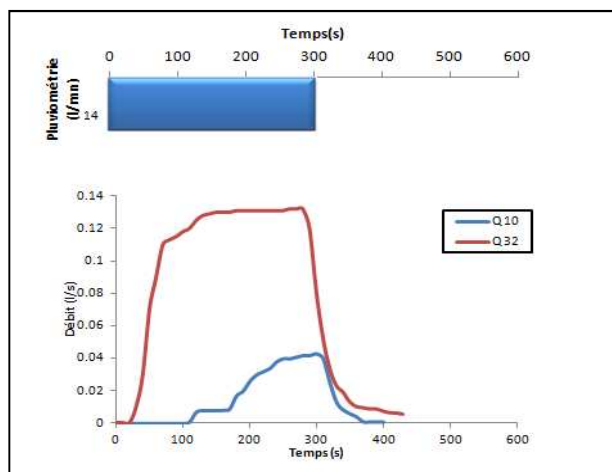


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

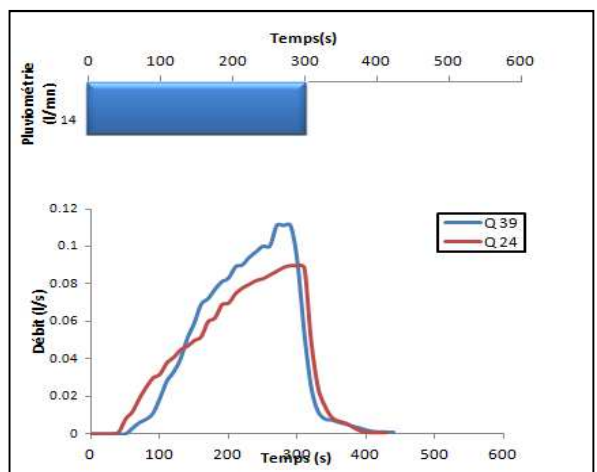


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

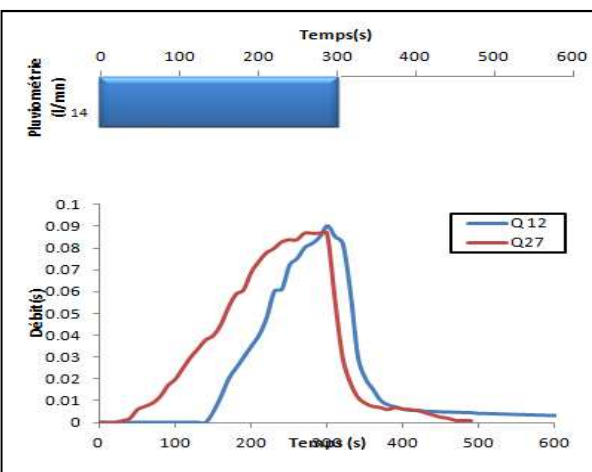
**Figure 52.** Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement très humide (intensité 8 l/mn pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

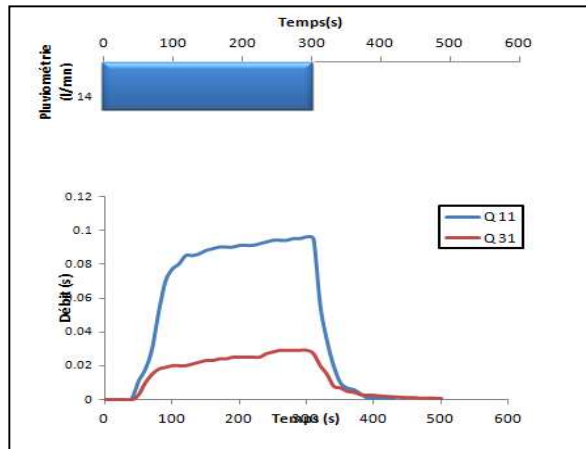


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

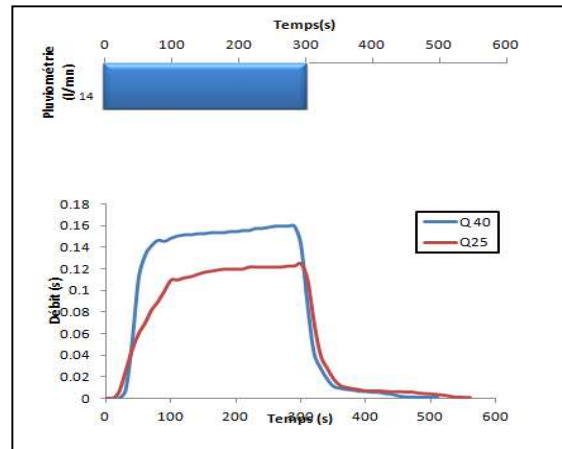


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

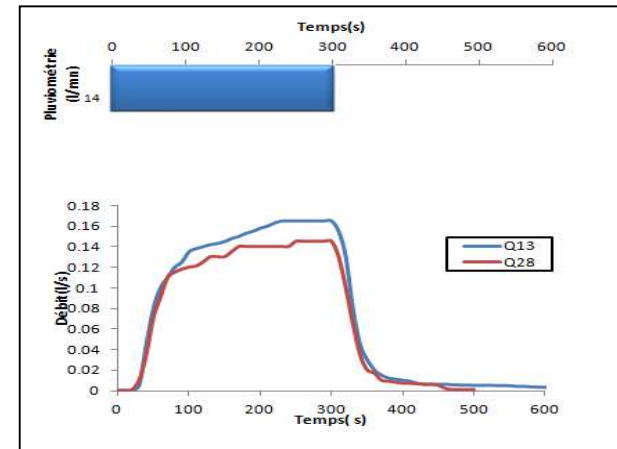
**Figure 53.** Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement sec (intensité 14 l/mn pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%

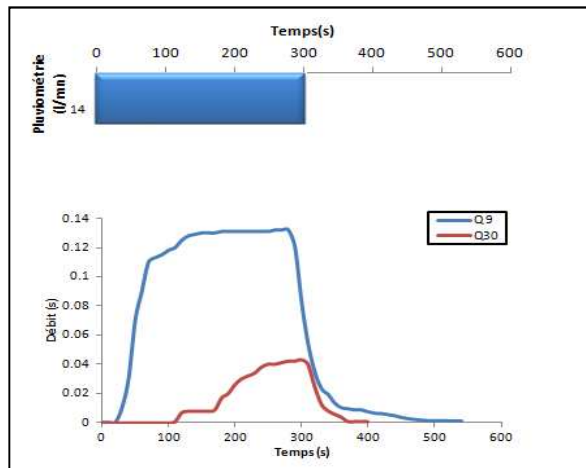


2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%

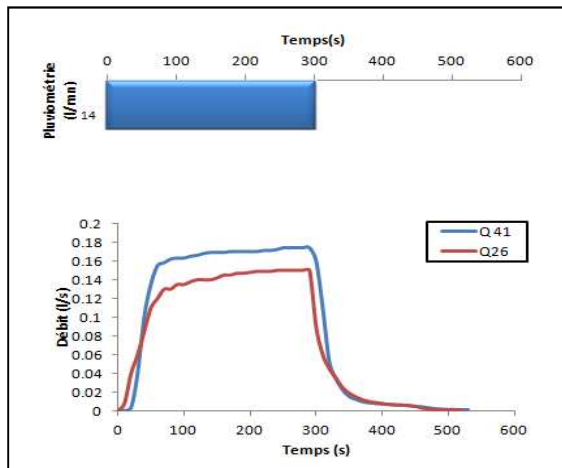


3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

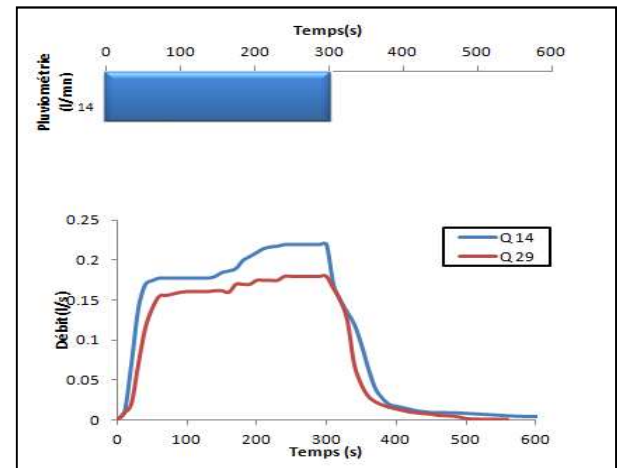
**Figure 54.** Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement humide (intensité 14 l/mn pentes 0- ,2- 4% )



1. Hydrogrammes résultants sous pente 0%



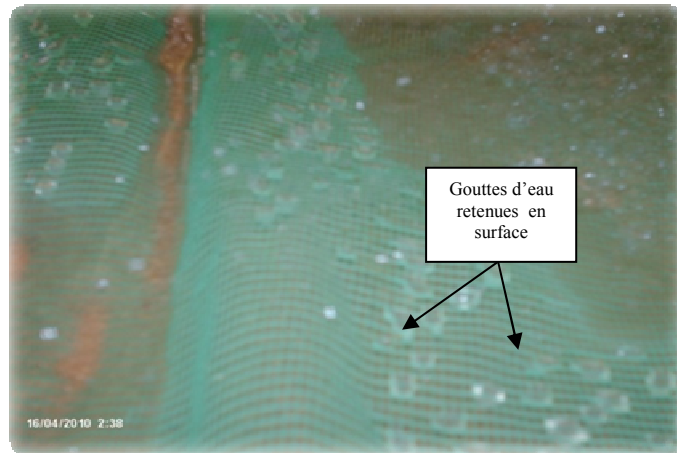
2. Hydrogrammes résultants sous pente 2%



3. Hydrogrammes résultants sous pente 4%

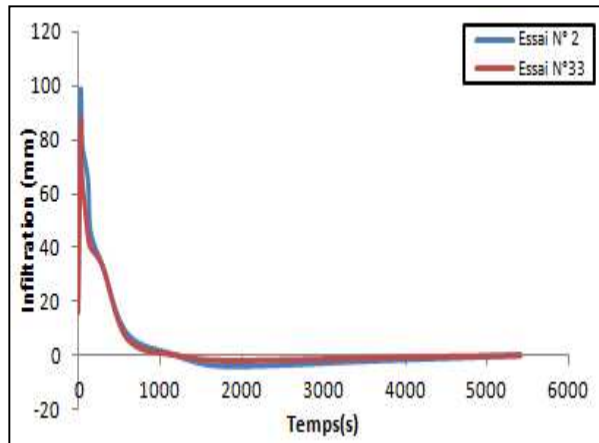
**Figure 55.** Hydrogrammes de crue résultants pour un sol initialement très humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 - 2 - 4 %).

Les observations relatives à l'interception sont faites dans les zones recouvertes de végétation artificielle (figure 56).

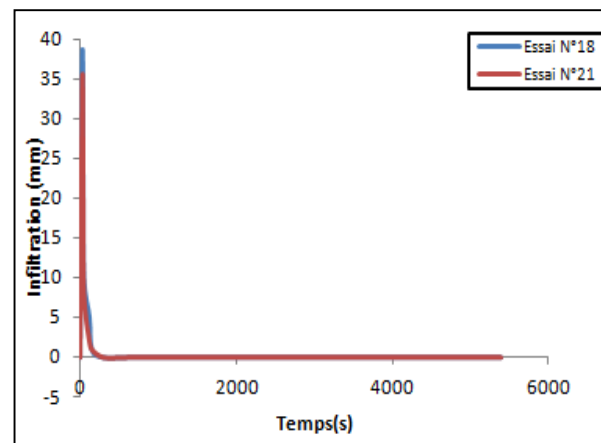


**Figure 56.** Interception d'eau de pluie par un couvert végétal simulé.

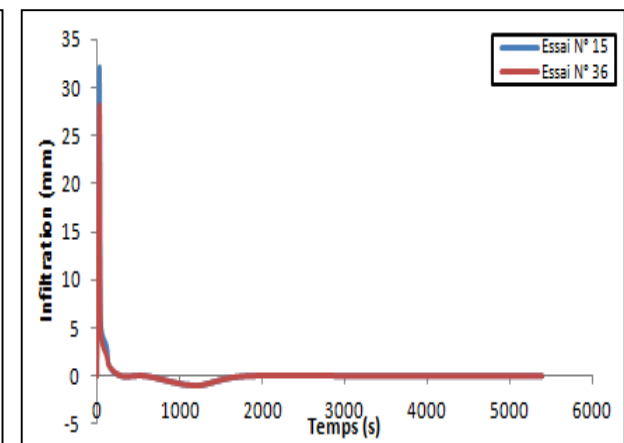




1. Relevé du piezomètre n° 2

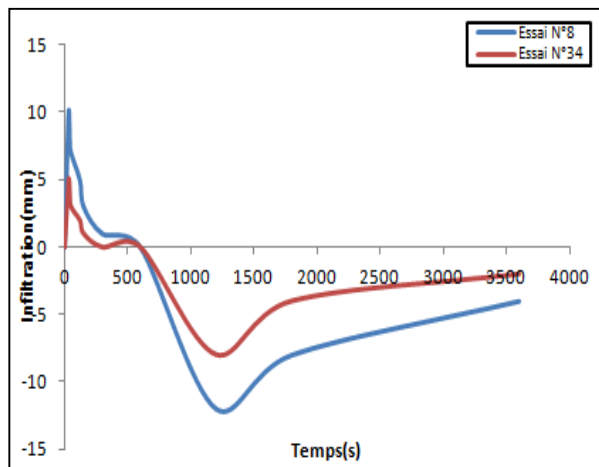


2. Relevé du piezomètre n° 1

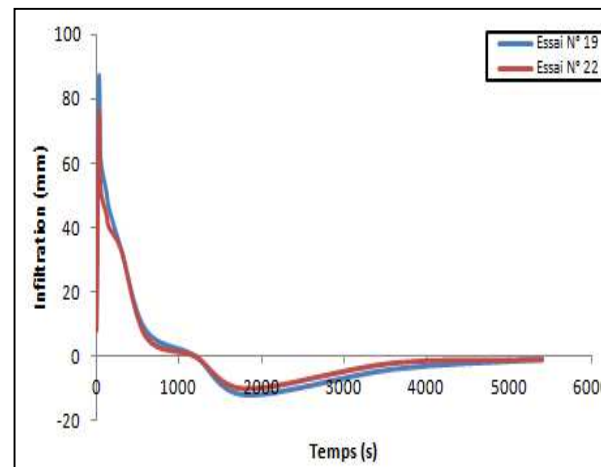


3. Relevé du piezomètre n° 9

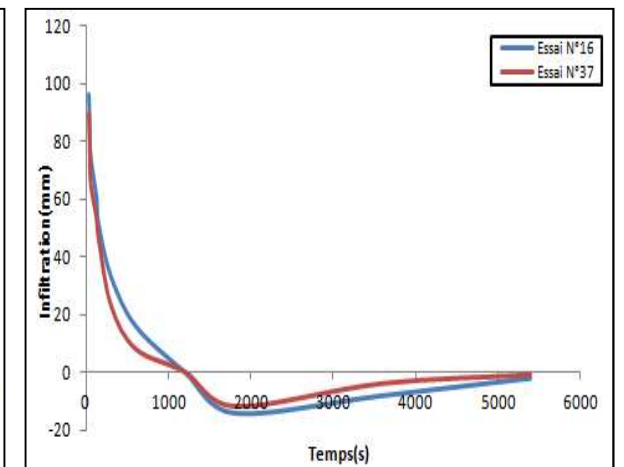
**Figure 57.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec (intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Relevé du piezomètre n° 7

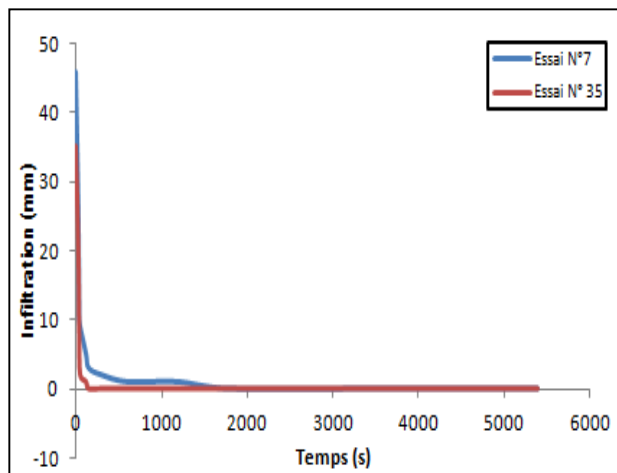


2. Relevé du piezomètre n° 19

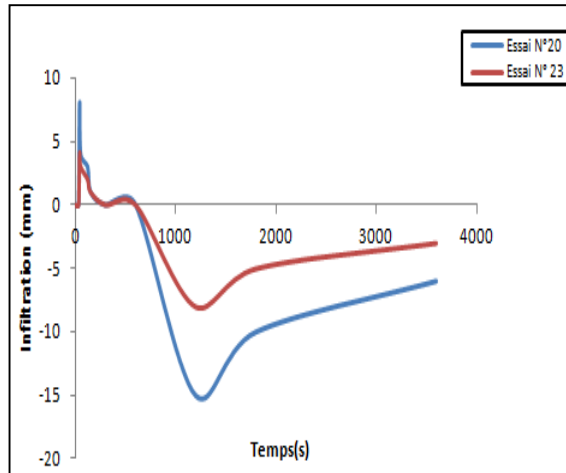


3. Relevé du piezomètre n° 6

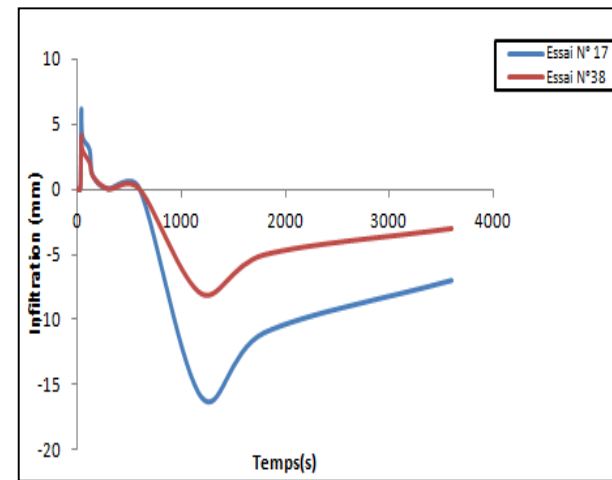
**Figure 58.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide (intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Relevé du piézomètre n°10

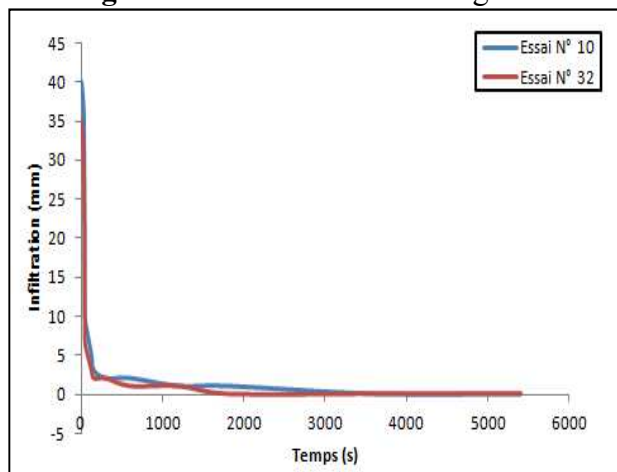


2. Relevé du piézomètre n°12

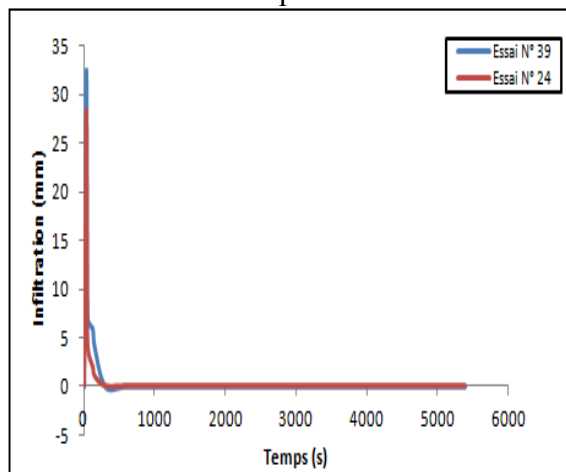


3. Relevé du piézomètre n°12

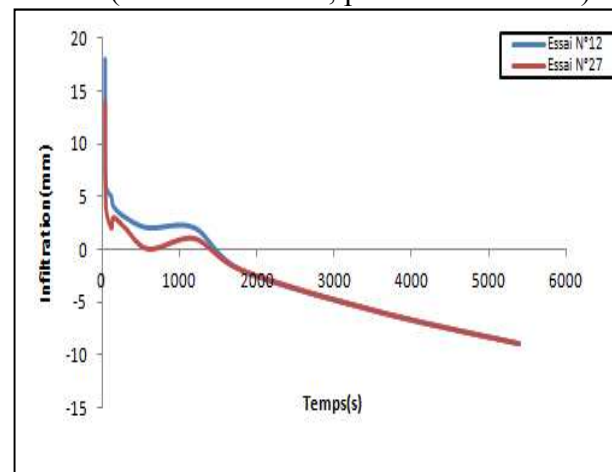
**Figure 59.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide (intensité 8 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Relevé du piézomètre n° 10

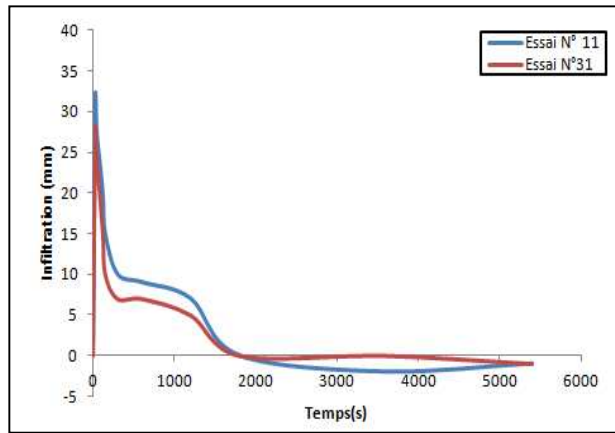


2. Relevé du piézomètre n° 11

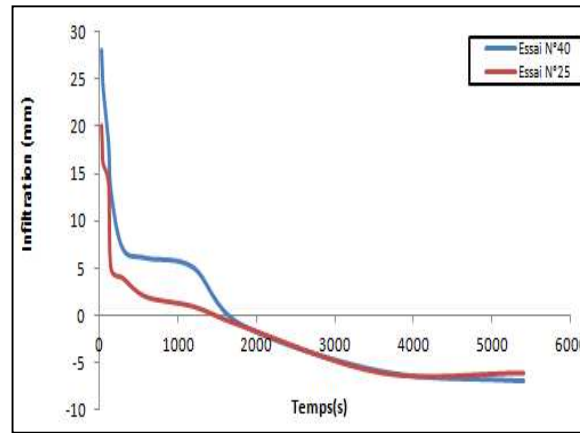


3. Relevé du piézomètre n° 14

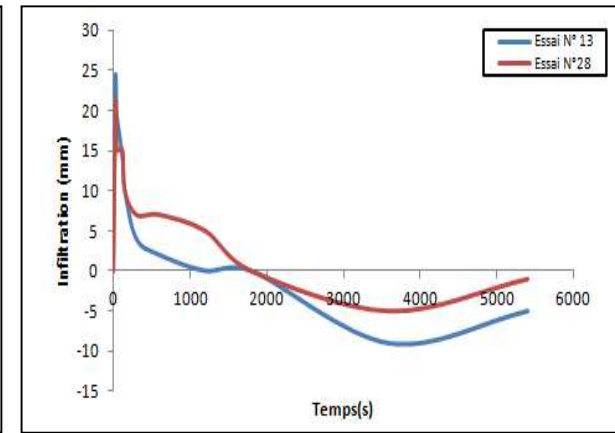
**Figure 60.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol sec (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Relevé du piézomètre n° 1

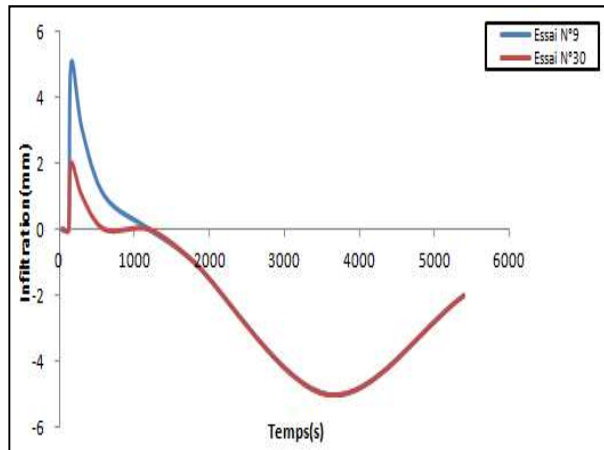


2. Relevé du piézomètre n° 13

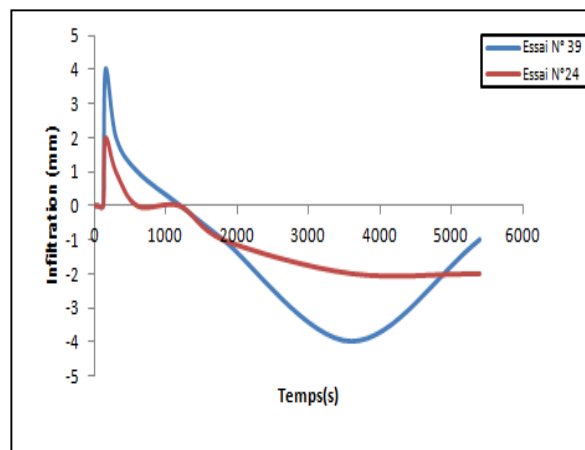


3. Relevé du piézomètre n° 17

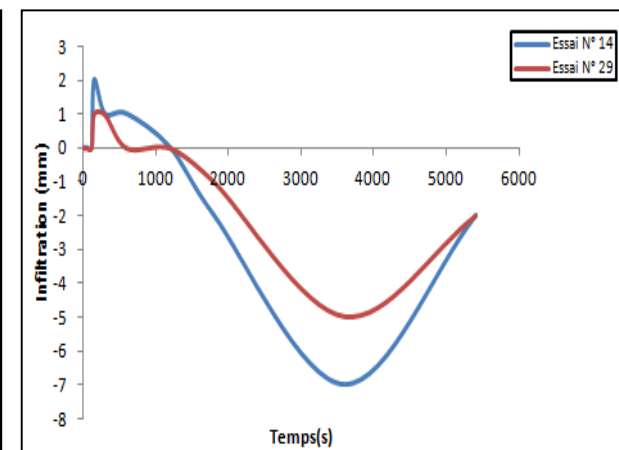
**Figure 61.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)



1. Relevé du piézomètre n° 3



2. Relevé du piézomètre n° 4



3. Relevé du piézomètre n° 14

**Figure 62.** Variation de la charge d'eau au niveau des différents piézomètres sur sol très humide (intensité 14 l/mn ; pentes 0 – 2 – 4 %)

## **Conclusion**

Après avoir analysé les hydrogrammes et les variations de la charge d'eau nous pouvons dire que la couverture végétale joue deux rôles :

- 1<sup>er</sup> rôle : celui d'un « frein » à l'écoulement de surface en augmentant la rugosité du sol (Laforgue, 1978). Ces quelques résultats expérimentaux confirment donc bien que la résistance au ruissellement diminue avec la pente topographique et augmente avec la présence du couvert végétal.
- 2<sup>ème</sup> rôle : celui d'un intercepteur des eaux de pluie qui diminue par conséquent l'infiltrabilité du sol, L'interception est particulièrement importante dans les petits bassins et peut être aussi un facteur important dont il faut tenir compte dans les bassins expérimentaux (Toebes et Ouryvaev, 1976).

## **6.4. Décomposition des hydrogrammes**

### **6.4.1. Introduction**

La genèse du ruissellement, qui correspond à la formation d'un débit, résultent de la combinaison de trois processus : écoulement de surface, écoulement de subsurface et écoulement souterrain. Il est nécessaire dans certains genres d'études d'identifier les composantes de l'hydrogramme observé. Plusieurs techniques sont utilisées à cette fin, dont on peut citer :

- Les méthodes simplifiées
- La méthode de Barnes (1939)
- La méthode d'évaluation du débit souterrain par corrélation avec le niveau piézométrique de l'aquifère.

Nous nous sommes intéressés à ce stade de l'étude à la décomposition de certains hydrogrammes précédemment analysés. Il est en général difficile de déterminer la position des changements de courbure sur l'hydrogramme. En pratique, nous avons suivi la procédure suivante pour séparer l'hydrogramme en ses divers composantes :

- On reporte l'hydrogramme de crue en portant sur une échelle logarithmique ;
- On ajuste une ligne droite à la courbe de décrue et la prolonge sous l'hydrogramme ;
- Ajuster une ligne droite à la courbe de tarissement et la prolonger sous l'hydrogramme ;

On détermine ainsi, assez aisément, les points d'inflexion.

A fin de comparer les résultats de la décomposition des hydrogrammes nous avons regroupé les essais selon l'humidité antécédente du sol en trois séries A, B et C.

### **6.4.2. Décomposition de la série A**

Cette série regroupe les essais réalisés sous une très forte humidité comme l'indique le tableau suivant :

**Tableau 13.** Conditions expérimentales pour la série A

Etat d'humidité antécédente	Pente 0 %		Pente 2 %		Pente 4 %	
	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2
Etat très humide	Essai 7	Essai 10	Essai 20	Essai 41	Essai 17	Essai 14

Les résultats sont représentés aux figures 63 et 64. D'après les figures 63 et 64 On a pu noter que les hydrogrammes de crue des essais réalisés sous faible intensité (N° 7, N° 20 et N° 17), montrent une montée et une décrue graduelles et leurs maximums est sous forme de pic, en particulier l'essai N° 7. Par contre les autres hydrogrammes ont une montée et une décrue brutales et leurs maximums est sous forme de palier, comme c'est le cas des essais N° 10 , 20, 41 et 17. On remarque aussi que le débit maximum de l'essai N° 41 est presque le double de l'essai N° 7. Celui de l'essai N°14 est d'environ trois (03) fois le débit max de l'essai N° 7. Le point d'inflexion est plus prononcé pour les hydrogrammes des essais effectués sous forte intensité pluviométrique par rapport aux autres essais. En plus, il apparaît très rapidement. Dans l'essai n°14, le tarissement débute à la 390<sup>ème</sup> seconde, par contre pour l'essai N°7, il apparaît à la 490<sup>ème</sup> seconde. On peut déterminer le volume total de ruissellement par la méthode suivante : l'écoulement total correspondant à une averse ou à une période pluvieuse est l'aire située sous l'hydrogramme. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

**Tableau 14.** Volumes totaux des eaux ruisselées et des eaux souterraines des essais de la série A

N° d'essai	Volume total d'eaux écoulées (litres)	Volume d'eau souterraine (Litres)	Ruissellement (%)
7	17.18	1.71	90.05
10	27.18	1.88	93.00
20	15.44	1.26	91.81
41	48.22	1.04	97.84
17	18.95	1.52	92.00
14	67.66	4.16	93.85

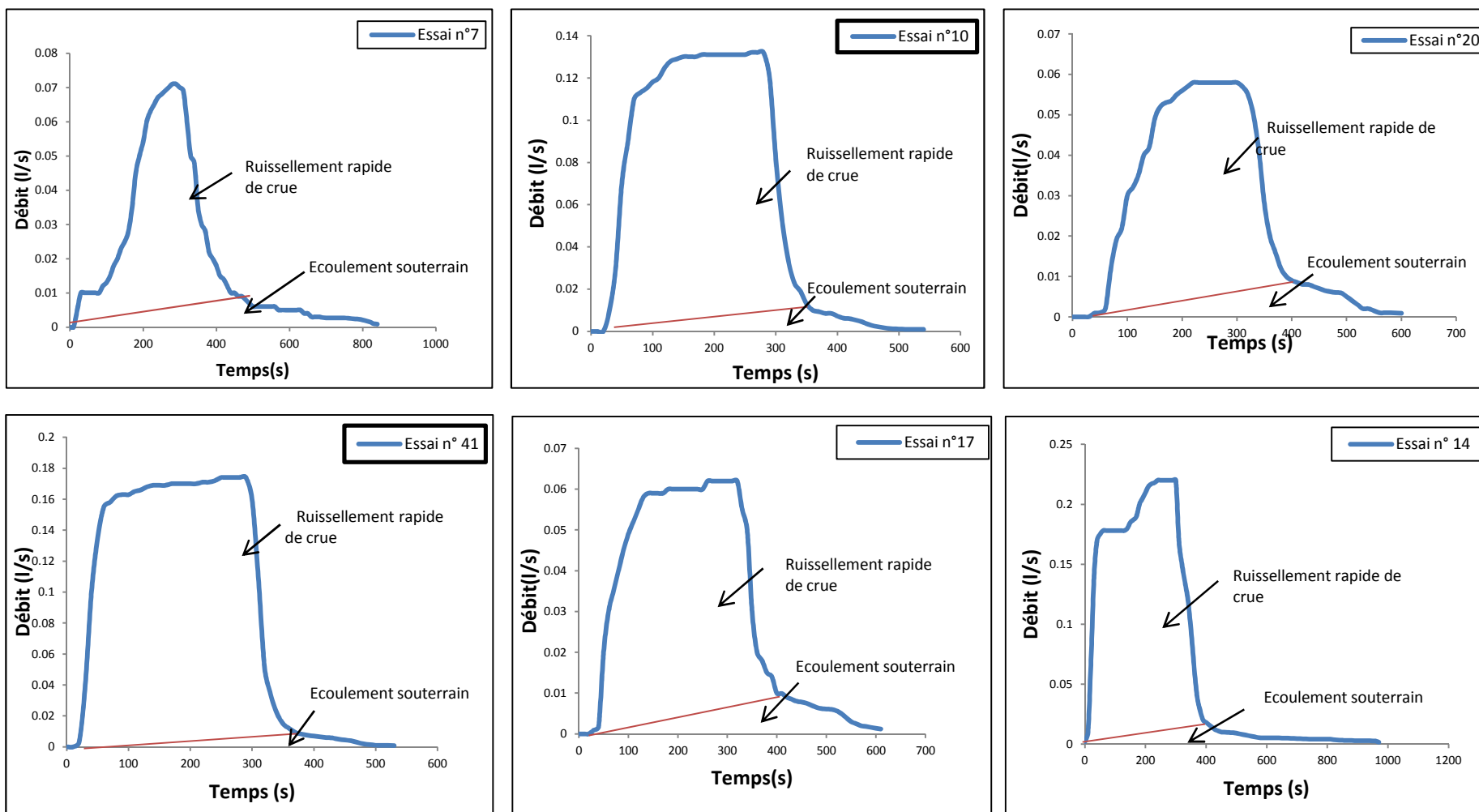


Figure 63. Décomposition des hydrogrammes des essais de la série A

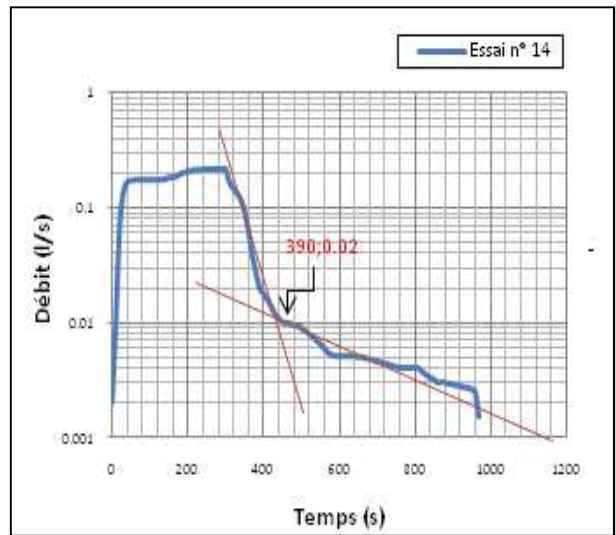
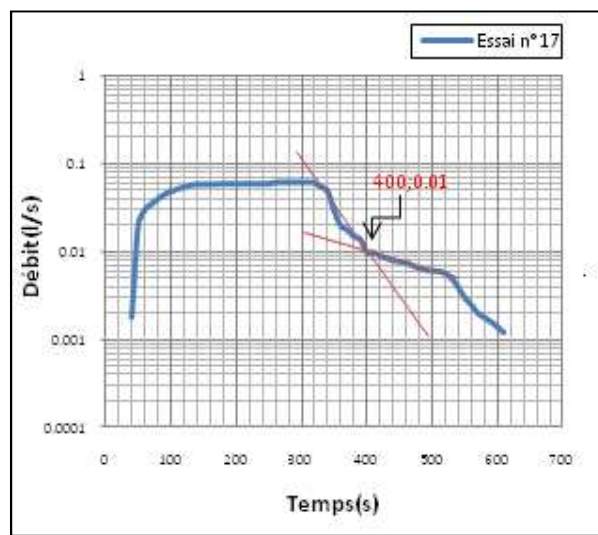
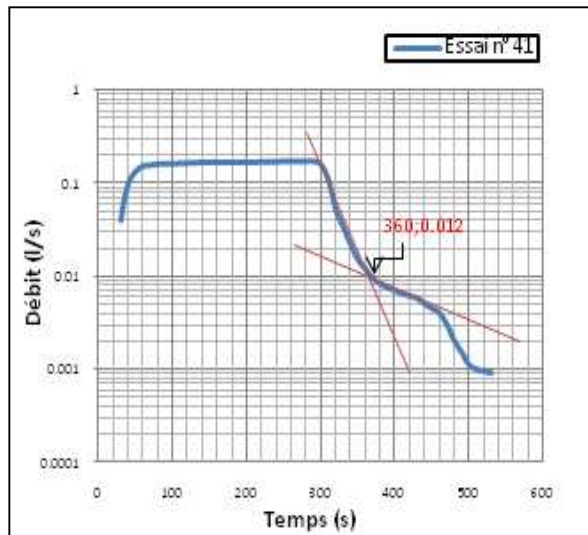
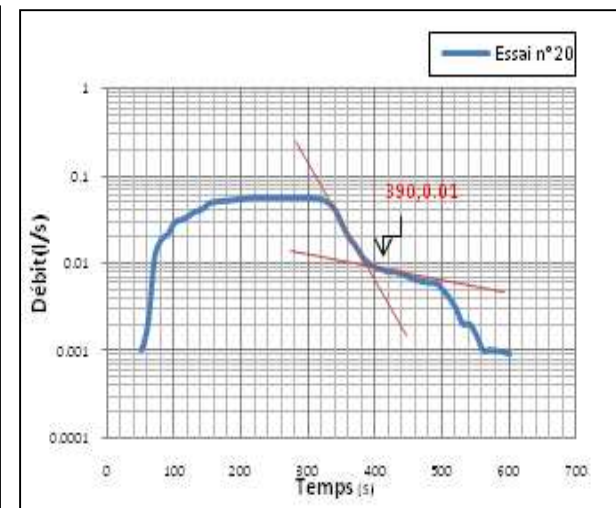
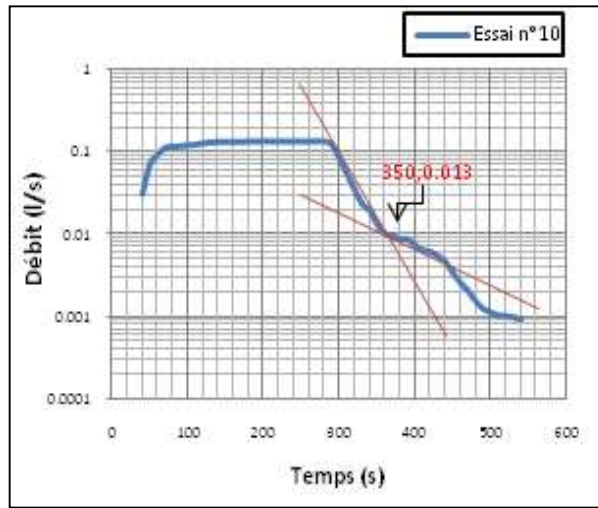
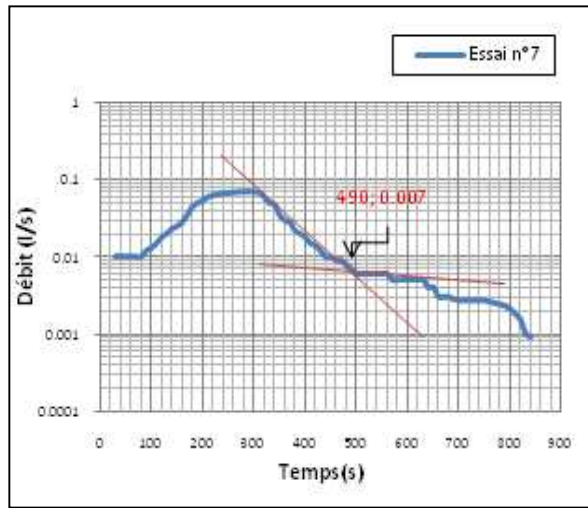


Figure 64. Méthode graphique de détermination du point d'inflexion des hydrogrammes de la série A



D'après le tableau ci-dessus, le volume total ruisselé de l'essai N°14 représente quatre (04) fois celui de l'essai N° 7.

La comparaison de cette première série d'essais, conduit à admettre une grande similarité des résultats des essais 10 et 41. La forme des courbes de montée, de décrue, les pics, les durées et les points d'inflexions des deux événements sont irrécusablement assez semblables.

Après avoir décomposé les hydrogrammes en écoulement de surface et écoulement souterrain, nous remarquons d'un côté que pour un sol initialement très humide la majorité du débit ruisselé est composée essentiellement d'eau superficielle (98 % ) du débit ruisselé de l'essai N° 41 résulte d'eau superficielle c'est un écoulement par saturation .D' autre côté, nous distinguons une participation notable des eaux souterraines pour l'essai N° 7 où 10% de l'eau ruisselée est une eau souterraine. C'est un écoulement souterrain en milieu saturée

#### **6.4.3. Décomposition de la série B**

Cette série regroupe les essais réalisés sous une moyenne humidité comme l'indique le tableau suivant :

**Tableau 15.** Conditions expérimentales pour la série B

Etat d'humidité antécédente	Pente 0 %		Pente 2 %		Pente 4 %	
	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2
Etat intermédiaire	Essai 8	Essai 11	Essai 19	Essai 40	Essai 16	Essai 13

Les résultats sont représentés dans les figures ci-dessous :

D'après les figures 65 et 66 nous constatons que la montée de l'hydrogramme de crue de l'essai N° 13 est immédiate alors que dans l'essai N° 8 et N°11 la réponse hydrologique est moins rapide (50 secondes). Les débits maximums de tous les hydrogrammes de cette série est sous forme de paliers et le débit max de l'essai N° 13 est d'environ cinq (05) fois celui de l'essai N° 8.

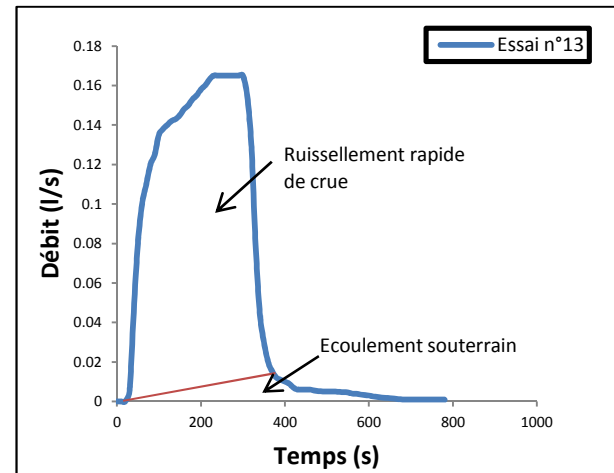
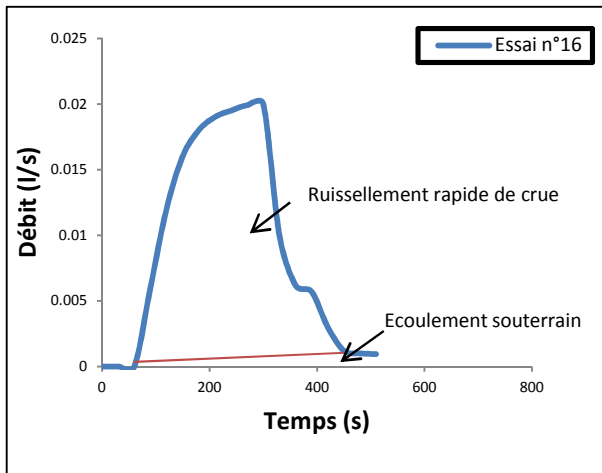
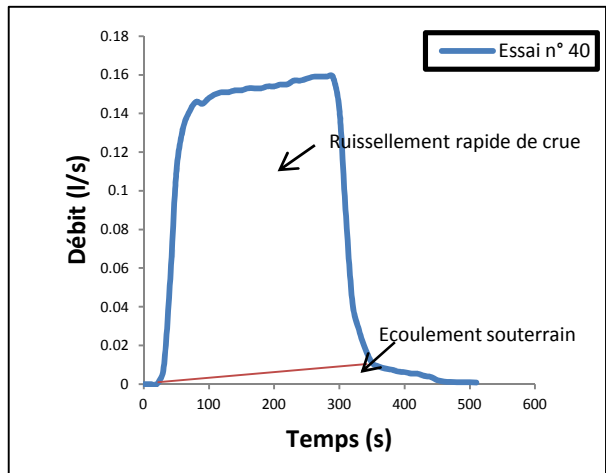
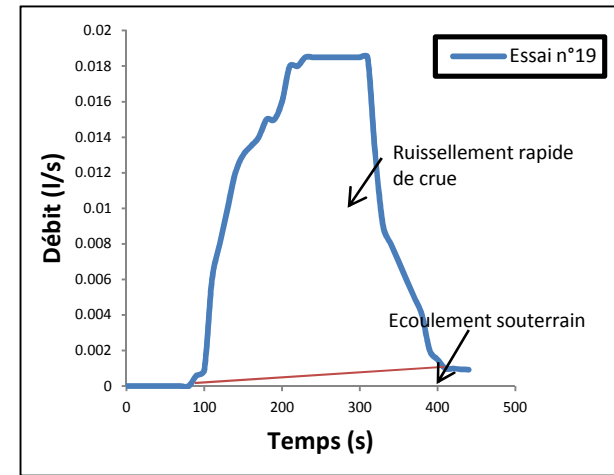
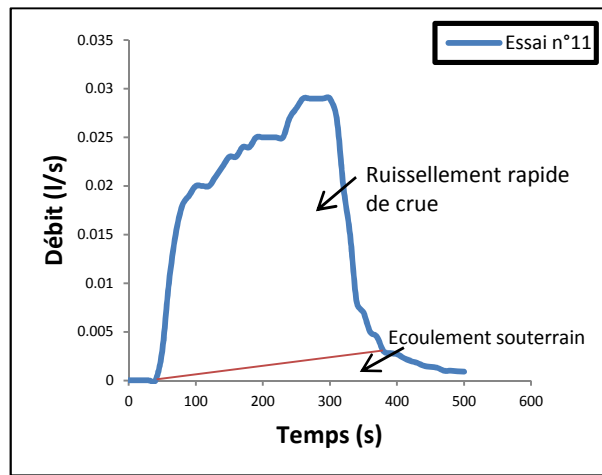
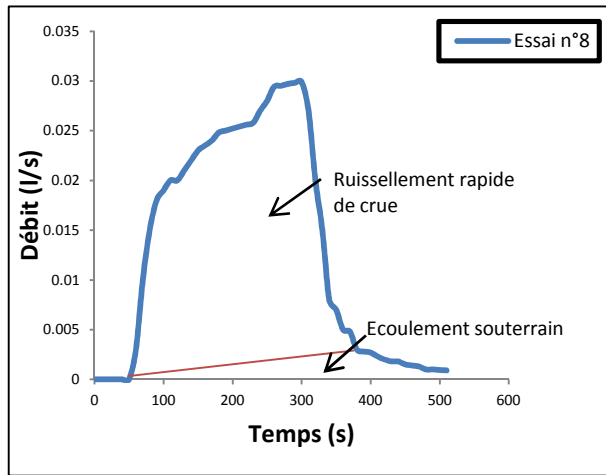


Figure 65. Décomposition des hydrogrammes des essais de la série B

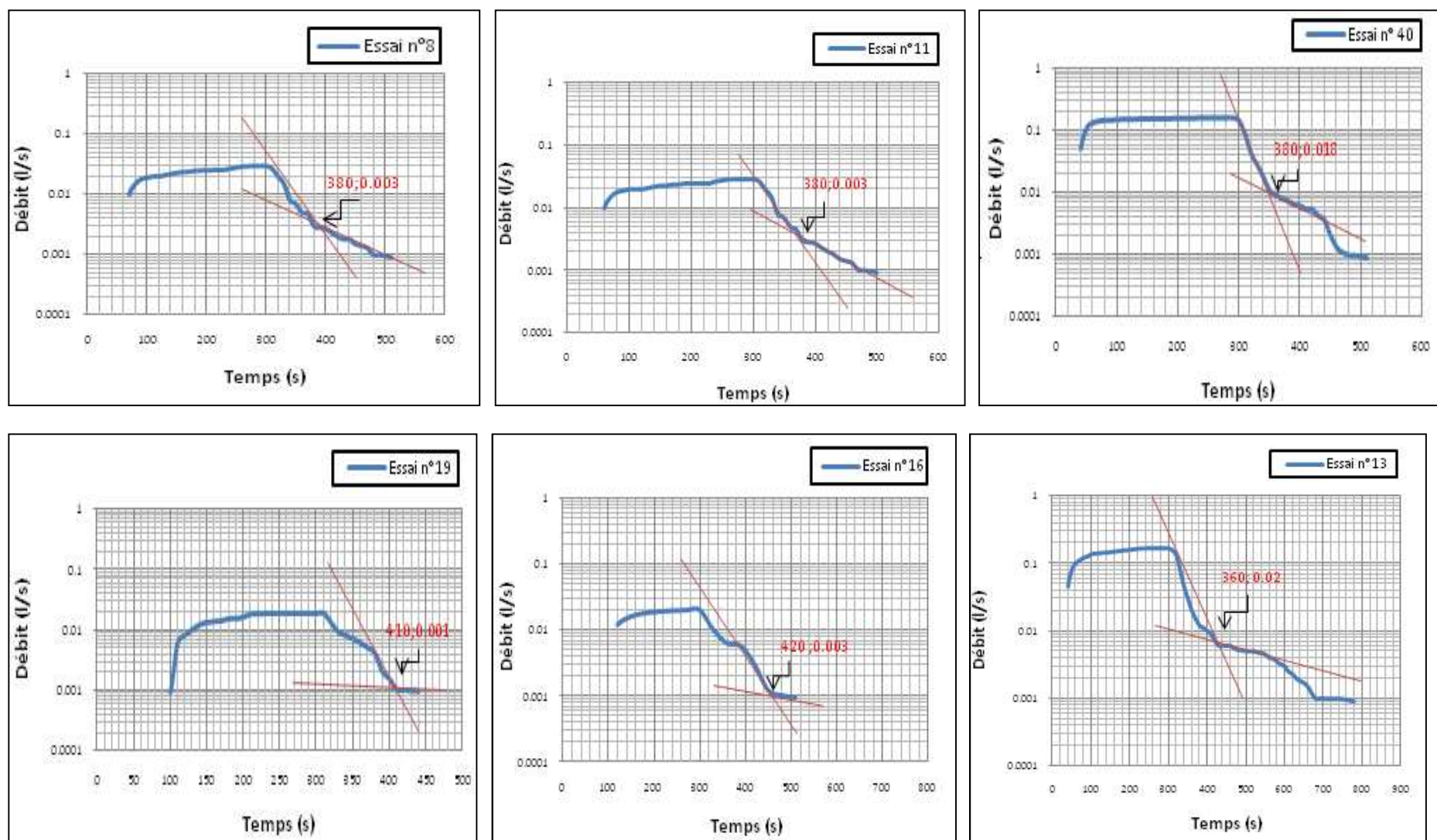


Figure 66. Méthode graphique de décomposition des hydrogrammes des essais de la série B

La décrue de l'hydrogramme de crue est graduelle dans l'essai n°8, 11 et 16, mais elle est brutale dans l'essai n°13.

Le point d'inflexion est plus prononcé dans l'essai N° 13 et il est localisé à la 360<sup>ème</sup> alors que dans l'essai N° 8 est marqué à la 380<sup>ème</sup> seconde.

**Tableau 16.** Volumes totaux des eaux ruisselées et des eaux souterraines  
des essais de la série B

N° d'essai	Volume total d'eau écoulé (Litres)	Volume d'eau souterraine (Litres)	Ruissellement (%)
8	6.85	0.23	96.65
11	6.96	0.21	96.96
19	4.06	0.23	94.24
40	42.36	0.66	98.43
16	4.93	0.31	93.60
13	45.04	2.20	95.14

D'après le tableau ci-dessus, le volume total ruisselé de l'essai N°13 est de sept (07) plus important que ce lui de l'essai N° 8.

Après avoir décomposé les hydrogramme en écoulement de surface et écoulement souterrain nous remarquons que le ruissellement superficiel est dominant. Plus de 98 % du débit ruisselé de l'essai N° 40 résulte d'eau superficielle c'est un écoulement par saturation. Par ailleurs, nous distinguons une participation des eaux souterraines dans le cas de l'essai N° 16, où 7% de l'eau ruisselée est une eau souterraine.

#### **6.4.4. Décomposition de la série C**

Cette série regroupe les essais réalisés sous une humidité très faible comme l'indique le tableau suivant :

**Tableau 17.** Conditions expérimentales pour la série C

Etat d'humidité antécédente	Pente 0 %		Pente 2 %		Pente 4 %	
	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2	Intensité 1	Intensité 2
Sol très sec	Essai 2	Essai 9	Essai 18	Essai 39	Essai 15	Essai 12

Les résultats sont représentés dans les figures ci-dessous :

C'est la série où les hydrogrammes sont assez différents en comparaison avec les séries A et B. Les figures 67 et 68 permettent de noter que la réponse hydrologique du bassin dans l'essai N° 12, est plus rapide que celles du reste des essais de la série.

Les débits maximums de tous les hydrogrammes de cette série sont tous sous forme de pic et le débit max de l'essai N° 12 est d'environ neuf (09) fois celui de l'essai N° 2. La décrue de l'hydrogramme de crue est graduelle pour les essais N° 2 et N°15, mais elle est brutale dans l'essai n°12.

Le point d'inflexion est plus prononcé dans l'essai N° 12 et il est localisé à 380<sup>ème</sup> alors que dans l'essai N° 2 il est localisé à la 450<sup>ème</sup> seconde.

**Tableau 18.** Volumes totaux Des eaux ruisselées et des eaux souterraines des essais de la série C

N° d'essai	Volume total d'eaux écoulées (Litres)	Volume d'eau souterraine (Litres)	Ruissellement (%)
2	1.53	0.30	80.37
9	1.81	0.29	84.16
18	0.70	0.21	70.36
39	17.86	0.66	96.31
15	1.56	0.47	69.91
12	13.86	2.60	81.26

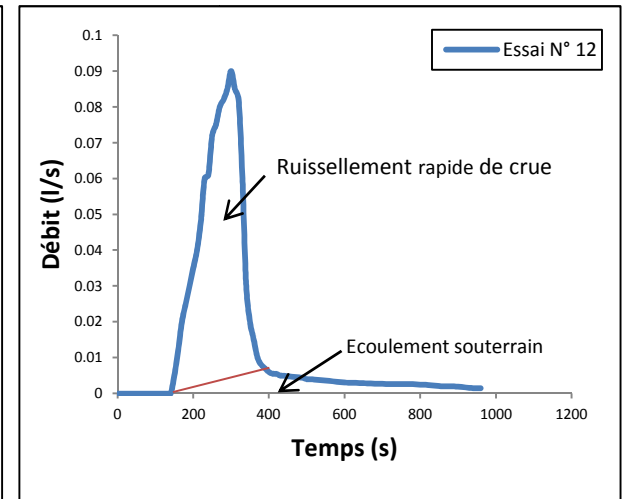
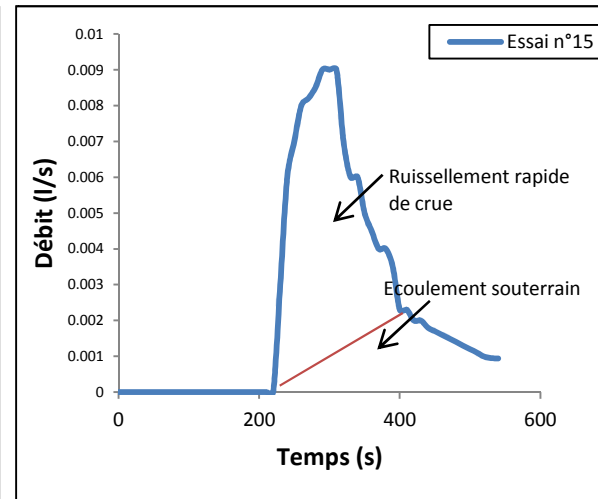
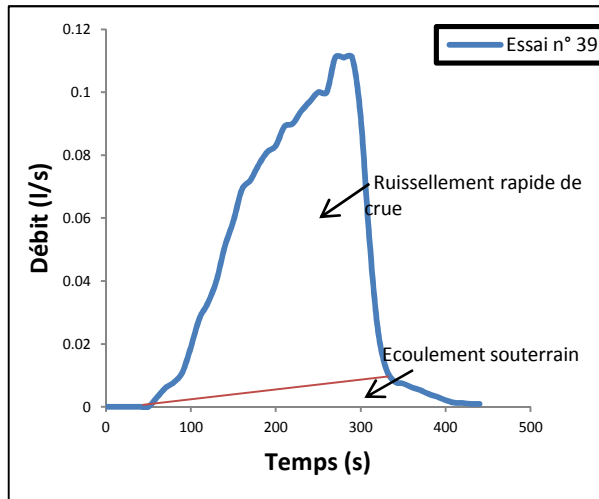
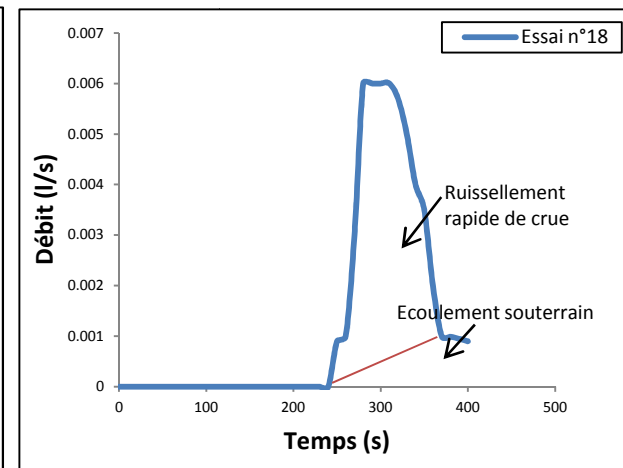
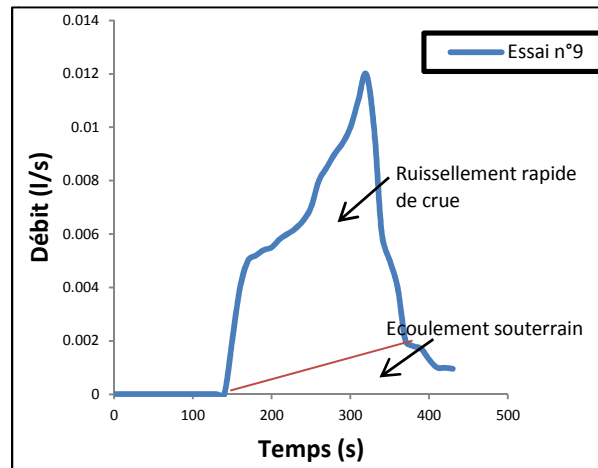
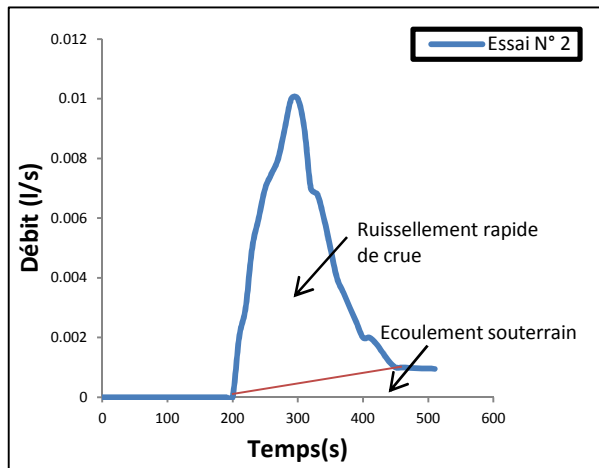


Figure 67. Décomposition des hydrogrammes des essais de la série C

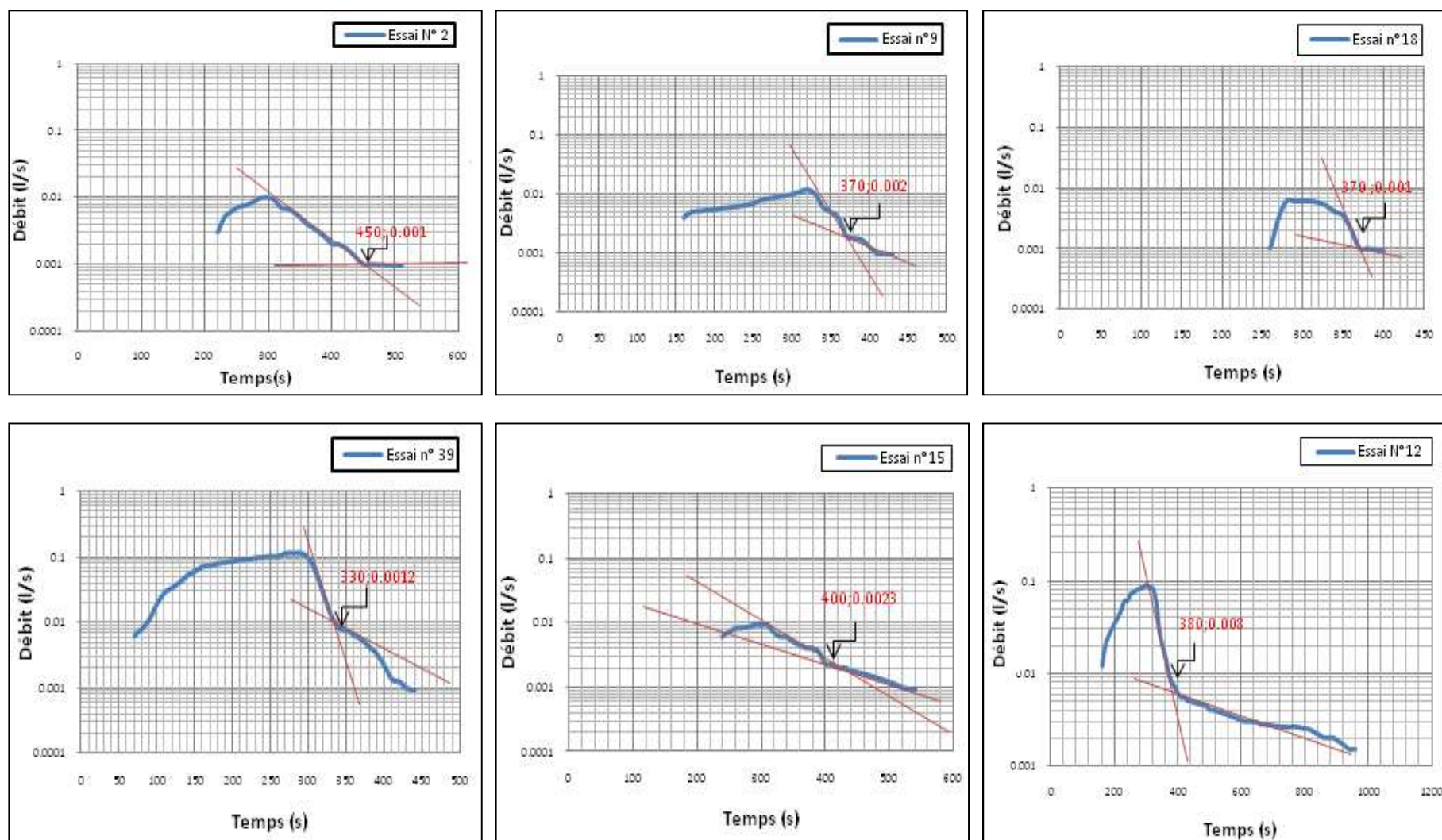


Figure 68. Méthode graphique de décomposition des hydrogrammes des essais de la série C

D'après le tableau ci-dessus, le volume total ruisselé de l'essai N°12 est plus important que ce lui de l'essai N° 2 ( $\approx 17$ ) fois plus grand) les cas extrême.

Après avoir décomposé les hydrogramme en écoulement de surface et écoulement retardé nous remarquons que l'écoulement superficiel est moins important par rapport aux deux cas précédent, et par conséquent la participation des eaux souterraines est appréciable. Pour les essais 15 et 18, elle est de 30 %. Ceci est du à la forte infiltrabilité d'eau dans le sol.

#### **6.4.5. Comparaison de cas extrêmes**

Il est intéressant de comparer parmi tous les essais réalisés les deux hydrogrammes extrêmement opposés, c'est-à-dire les essais N°2 (figure 67) et N°14 (figure 63) qui résument les faibles et les fortes conditions d'écoulement.

L'essai N°2 et N° 14 sont réalisés sous différentes conditions expérimentales et pour rappel, le tableau (19) suivant résume ces conditions.

**Tableau19.** Conditions de réalisation des deux essais N°2 et N°14

N° d'essai	Humidité antécédente	Pente (%)	Intensité de la pluie (L/mn)
2	Sol très sec	0	8
14	Sol très humide	4	14

Pour l'essai N° 14, la réponse hydrologique du bassin était immédiate. La montée et la décrue sont brutales. Le débit max est sous forme de palier. Par contre pour l'essai N° 2, le ruissellement n'a commencé qu'après la 200<sup>ème</sup> secondes et croit graduellement. L'allure de l'hydrogramme est aigue.

Le débit max de l'essai N° 14 est d'environ 20 fois celui de l'essai N°2 et le volume total ruisselé est plus important dans l'essai N° 14. Il est à noter que le volume des eaux souterraines représente 20% du volume totale ruisselé pour l'essai N°2, alors que pour l'essai N°14 il est 6%. C'est un écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (effet de l'intensité double).

Le point d'inflexion est plus prononcé dans l'essai N° 14. Le ressuyage commence à la 390<sup>ème</sup> secondes pour l'essai N° 14 et à la 450<sup>ème</sup> secondes pour l'essai N° 2 (effet de la pente).



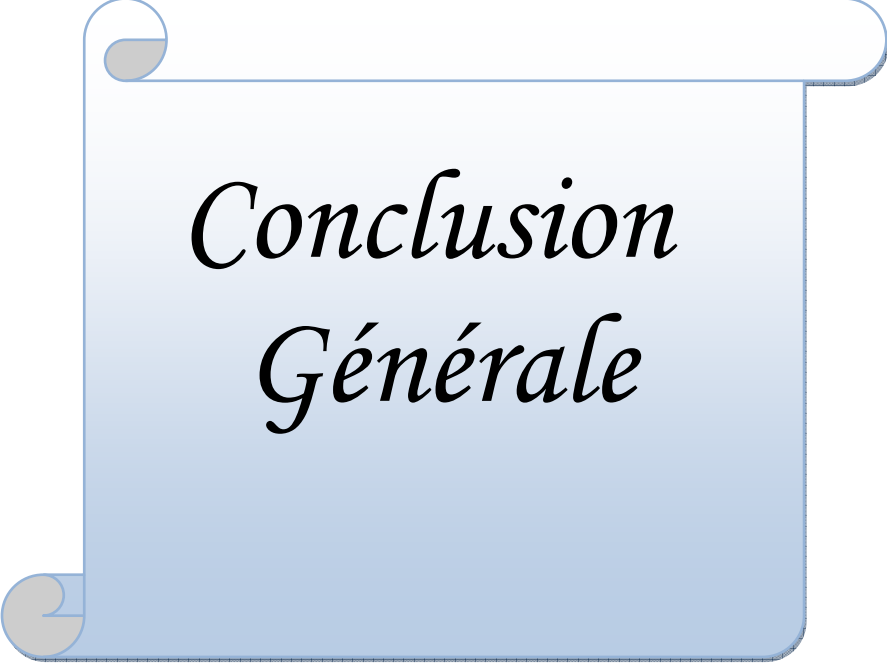
Dans certain cas des séries étudiées précédemment, il est tout à fait clair que la comparaison de deux essais réalisés sous les mêmes conditions expérimentales d'humidité antécédente et de pente mais d'intensités pluviométriques différentes, permet de conclure que le volume des eaux de ruissellement de l'essai effectué sous la faible intensité pluviométrique est supérieur à celui de l'essai réalisé sous forte intensité pluviométrique. Nous retrouvons que pour :

- Série A : le volume des eaux souterraines de l'essai N°20 (Intensité =8 l/mn) est 9% du volume total ruisselé, alors que celui de l'essai N°41 (Intensité =14 l/mn) est 2% du volume total écoulé
- Série B : le volume des eaux souterraines de l'essai N°19 (Intensité =8 l/mn) est 6% du volume total ruisselé, alors que celui de l'essai N°40 (Intensité =14 l/mn) est 2% du volume total écoulé.
- Série C : le volume des eaux souterraines de l'essai N°15 (Intensité =8 l/mn) est 30 %du volume total ruisselé, alors que celui de l'essai N°12 (Intensité =14 l/mn) est 19% du volume total écoulé.

### **Conclusions**

Le volume total écoulé est le résultat de la combinaison des eaux superficielles et des eaux souterraines mais certains paramètres influencent le pourcentage de participation de ces eaux, à savoir :

- L'intensité pluviométrique ;
- La pente ;
- L'humidité antécédente du sol ;
- les propriétés physiques et hydriques du sol



*Conclusion  
Générale*

## CONCLUSION GENERALE

L'étude conduite sur le bassin expérimental a pour objectif l'amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants lors du forçage atmosphérique.

L'eau ruisselé et/ou infiltré dépend de nombreux facteurs soit externes tel que les conditions climatiques du milieu et la morphologie du bassin versant, soit à des facteurs internes comme les propriétés physiques du bassin, la structure du réseau hydrographique et l'état antécédent d'humidité des sols. Dans ce travail, notre premier objectif à travers une série des essais expérimentaux est de définir : sur quel point influencent ces paramètres dans les comportements hydrologiques ?

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur un banc d'essai d'hydrologie muni d'un simulateur de pluie, afin de réaliser chaque essai, nous avons choisi deux débits entrants 8l/min et 14 l/min et trois pentes (0%,2%,4%), les essais sont réalisés sur sol nu et sol couvert sous différents états d'humidité du sol, afin d'étudier l'influence des composantes: intensité, pente et le couvert végétal sur le ruissellement sous différentes états d'humidité du sol.

La première série des essais ont été utiles pour montrer deux buts, le premier est la vérification du bon fonctionnement du matériel utilisé et le second consiste à l'étude de l'influence de l'humidité antécédente du sol et à ce propos nous avons conclu après l'analyse des hydrogrammes et les courbes d'infiltration que l'humidité initiale du sol influe sur l'hydrogramme de point de vue forme (crue, maximum), allure (exp : aplatissement) et le volume d'eau ruisselé, ainsi que le taux d'infiltrabilité du sol qui est inversement proportionnelle à l'humidité antécédente du sol.

En comparant les essais de simulation réalisés sous une pluie simulée dont l'intensité est de 8 l/mn et 14 l/mn, sur trois pentes différentes : 0%,2% et 4% et sur sol nu pour les mêmes conditions d'humidité, nous avons remarqué que le volume d'eau ruisselé et l'infiltrabilité du sol sont influencé par le fait de la pente.

De même, en comparant les essais réalisés pour les mêmes conditions d'humidité initiale sur sol nu et sous intensité 8l/mn et ceux de l'intensité 14 l/mn, le fait de l'intensité double sur la

réaction hydrologique du sol élaboré était sur les points suivants : L'allure de l'hydrogramme, le volume ruisselé et le taux d'infiltrabilité du sol.

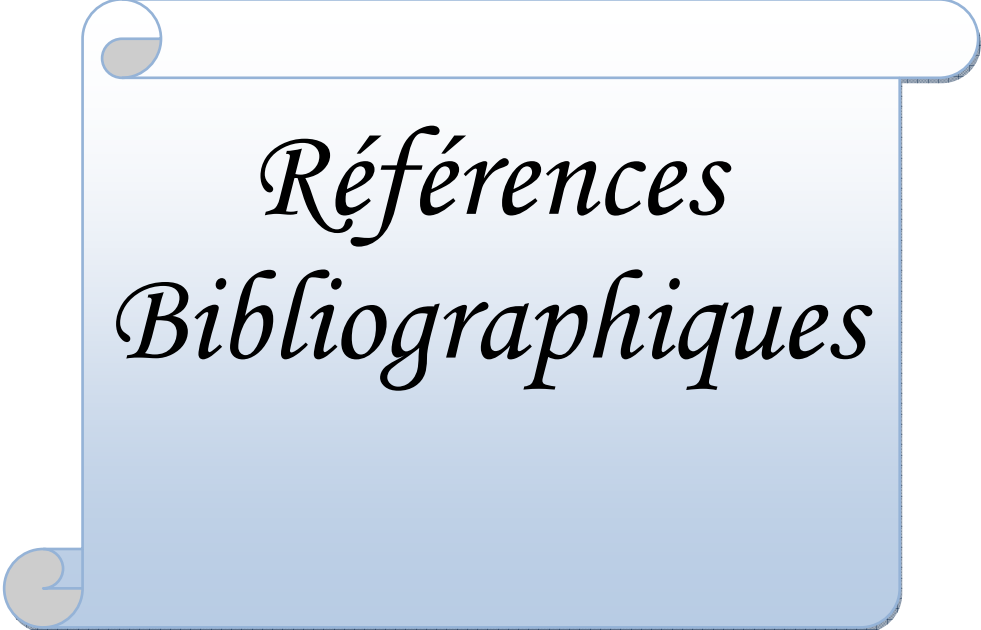
Les mêmes essais étaient réalisés précédemment ont été repris en mettant en jeu une simulation du couvert végétal. A partir de la comparaison de ces deux séries d'essais nous pouvons déduire que la couverture végétale joue deux rôles, le premier est celui d'un frein et le second celui d'un intercepteur des eaux de pluie.

La dernière partie du mémoire était consacrée à la décomposition graphique des hydrogrammes de crue et son analyse nous permet de conclure que le volume total écoulé est le résultat de la combinaison des eaux superficielles et des eaux souterraines mais certains paramètres influencent le pourcentage de participation de ces eaux, à savoir : l'intensité pluviométrique ; la pente ; l'humidité antécédente du sol ; les propriétés physiques et hydriques du sol.

Les résultats trouvés ont confirmé le fait que la réaction hydrologique du bassin versant est influencée de façon directe ou indirecte par le fait de l'humidité initiale du sol, pente, l'intensité pluviométrique et le couvert végétal.

Généralement, dans les études expérimentales nous pouvons modifier volontairement les conditions naturelles du bassin en question, c'est-à-dire au moins l'une des caractéristiques, et on étudie l'effet de ces modifications sur le comportement hydrologique du bassin. Dans le cas présent, la réalisation des essais et la prise des mesures était effectuée manuellement ce qui constituait une véritable contrainte de temps, ainsi que l'indisponibilité du sol.

Pour finir, l'étude du processus de ruissellement doit être poursuivie pour mieux caractériser l'influence des différents paramètres sur la réponse hydrologique sur le banc d'essai d'hydrologie. Il est évident que ce dernier ne possède pas la même réponse hydrologique d'un bassin naturelle. En ce sens nous voulons bien collaborer une comparaison de ces deux réponses dans les mêmes conditions.



*Références  
Bibliographiques*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### Liste des livres et des articles

- Allain Jegou, C., 2002. Relations végétation-écoulement –transport solide dans le lit des rivières etude de l'Isère dans le Grésivaudan. Thèse de doctorat, Grenoble, p., 18.
- Ambroise, B., K. J. Beven, and J. Freer., 1996. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity, *Water Resour. Res.*, 32(7), p.,2135-2145.
- Ambroise, B., 1998. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, p., 3.
- Processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11, p., 471-495.
- Asseline, J., et Valentin, G., 1977. Construction et mise au point d'un infiltromètre 5 , aspersion (ou mini-simulateur de pluies). *Cah. ORSTOM, sér,Hydrol.*, 15 ( 4 ),p., 321 - 349.
- Asseline, J.et Valentin C.,1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM XV(4)*,p., 321-349.
- Asseline, J.,1997. Le simulateur de pluie en 1997(type ORSTOM, Asseline - Valentin) adaptations aux zones semi-arides et de montagne. Centre ORSTOM,34032 Montpellier,p., 273-274.
- Barnes, B.S., 1939.The structure of discharge –recession curves .*Trans .Amer.Geophys.Union* 20,p.,721-725.
- Benkhelil, H., Abriak, NE., Masson, F.X., Boulemia, C., Henry, E., 2004. Démarche méthodologique pour la conception d'un Micro- simulateur de pluie pour les milieux rural et urbain. Applications aux phénomènes d'infiltration et de ruissellement. Université d'Artois, France, p., 532-533.
- Betson, R.P., 1964. Wath is watershed runoff, *J. Geophys. res.*, 69,p., 1541-1551.
- Bulletin technique du banc d'essai d'hydrologie.
- Bufalo M.et Elleuch, F., 1987. Simulateur de pluie : application a l'étude des processus d'infiltration et d'erosion des terres agricoles du Lauragais (Hte Garonne).
- Bulletin technique du banc d'essai d'hydrologie.
- Cappus, P., 1960. Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche*, p., 493-518.

- Caquot, A., 1941. Écoulement des eaux pluviales, Compte rendu de l'Académie des sciences de Paris du 20 octobre 1941.
- Casenave, A., 1982. Le mini-simulateur de pluie : Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, ser Hydrol., vol. XIX, no 4, p., 207-210.
- Casenave, A., 1983. Etude du ruissellement et de l'infiltration: technique des pluies simulées. ORSTOM, Lomé.
- Casenave, A., 1991. Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris.p.,79-81-84.
- Casenave, A., Valentin, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Orstom, Coll. didactiques.
- Castany, g., 1967. Traite pratique des eaux souterraines, Dunod, Paris , p., 661.
- Chapman, T., 1989. Hydrological systems and processes. En: Comparative hydrology (éd. par Falkenmark, M. & Chapman, T . ). UNESCO, p., 43-66.
- Chocat, B., (1977). Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Lavoisier Tec et Dec, p., 832.
- Commons G., 1942. Flood hydrographs . Civil Engr. 12, p., 571-572.
- Cosandedy, C., D. Boudjemline, E. Roose et F. Lelong., 1990. Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. z. Geomorph., Suppl. 34, p. 61-73; Berlin-Stuttgart.
- Corey, A.T., 1977. Mechanics of heterogenous fluids in porous media, Water resourc. Publ., Fort Collins, Colorad.
- Crawford, N.H. and R.K. Linsley, 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, p., 210.
- Dunne, T. and Black, R., 1970. An experimental experimentation of runoff production in permeable soils. Water Ressources Research, 2, p., 478-490.
- Gray, D.M., et J.M. wigham., 1972. Etude générale du ruissellement et de la précipitation, chapitre VII.
- Guo, et James, C.Y., (2001). Rational Hydrograph Method for Small Urban Watersheds, Journal of Hydrologic Engineering. July-August, p., 352-356.
- Hewlett J.D., 1961. Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watershed, US Dept, Agric. Forest Ser., Station Paper 132, p., 11.

- Hewlett J.D., Hibbert A.R., 1963. Moisture and energy conditions within sloping soil mass during drainage, *J Geophys. Res.*, 68, p., 1081-1087.
- Hewlett, J. and Hibbert, A., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, New York, p., 275-290.
- Horner, w.w., and F.L.Flynt .1936.Relation between rainfall and runoff from urban areas.*Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*101, p.,140-206.
- Horton, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14, p., 446-460.
- HYCOS –Stage de formation en hydrométrie. ,2007. Mesurage et calcul des débits liquides Jaugeages à l’ADCP « projet Niger ». Document IRD,p., 4-30.
- Iorgulescu, I., 1997. Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant : application au bassin versant de la Haute-Mentue. Thèse EPFL, n° 1613.
- Kirkby M.J., 1978. *Hillslope Hydrology*, Wiley, New York
- Kuichling, E., (1889). The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts.*Transaction of the american society of Civil enginners*, 20.p.,37-40.
- Laborde, J.P. ,2000. *Elements d'hydrologie de surface*. U.M.R. 5651 "ESPACE" DU C.N.R.S.
- Lafforgue, A., 1976. Exemple d’analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées .*Cah ORSTOM, sér. Hydrol.*, ml. XIII, n° 3.
- Lafforgue, A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d’infiltration sur parcelles Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIV, n° 4.
- Lafforgue, A., 1978. Détermination des variations de la Capacité d'absorption d'un sol en place sous averses simulées. *l'ORSTOM, Paris, France*, 23, 3, 9, p., 355-358.
- Lamachere, J. M.,1991. Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage.*ORSTOM, Burkina Faso*, p., 116-118.
- Lambert, R., 1967. Recherche de la structure hydrologique un bassin-versant. In: *Annales de Géographie*. 1968, t. 77, n°424, p., 687-706.
- Lambert R ., 1996. *Geographie du cycle de l’eau* .*Presse universitaire du Mirail,Toulouse*, p.,439.



- Linsley, R.K., Kohler M.A., and Paulhus, J.L.H., 1949. Applied hydrology. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y.
- Mulvaney, T.J., (1850). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observation of the relation of rainfall and floods discharges in a given catchment. Proceedings of the Civil Engineers of Ireland. 4. p., 18-31.
- Mulvaney, T.J., (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges. Proceedings of the institution of civil engineers, 4(2). p., 1-8.
- Musy, A. et Higy, C., 1998. Hydrologie appliquée. Edition \*H\*G\*A\*, Bucarest.
- Musy, A., et Higy, C., 1998. Presses polytechnique et universitaire Romandes, Lausanne.
- Musy, A., Souterr., 1991. M. Physique du sol, Presses Polytechniques universitaire Romandes, Lausanne.
- Ogden F. L., Watts B. A., 2000. Saturated area formation on non convergent hillslope topography with shallow soils : a numerical investigation. W. Resour. Res., 36 (7), p., 179-1804.
- O.M.M. ,1994. Guide des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Cinquième édition, p., 147-181.
- Petite hydroélectricité., 2005. Guide technique pour la réalisation de projets.
- Penmann, H.L., 1963. Végétation and Hydrology .Commonwealth Bureau of Soil Technical Communication N°53, Buck (UK), p., 124
- Riou, C. Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenus en laboratoire sur des sols initialement secs. Institut national de la recherche agronomique, Tunis, p., 447-452.
- Rodier, J., 1992. Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens. I'ORSTOM. Collection études et thèses, Paris, France, p., 7-15.
- Sherman, L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method, Engineering News Record.
- Singh , V.P ., 1988. Hydrologic systems : Rainfall-Runoff modeling, volume 1. Prentice Hall, p., 10.
- Sklash , M.G., et Farvolden, R.N., 1979. The role of groundwater in storm runoff, J. Hydrol., 43, p., 45-65.

Smith, Alan. A., and Lee Ken-Beck., (1984). The rational method revisited. Can. J. Civ. Eng. Vol. 11, p., 854-862.

Tassin, B., 2005. Calcul des débits d'eaux pluviales. Méthodes non-dynamiques.

Toebes ,C. et Ouryvaev ,V., 1970 . Les bassins représentatifs et expérimentaux. Guide international des pratiques en matière de recherche. Chap. 4-5-1. (1 Infiltromètres D. Public. UNESCO-AISH, p., 161-171.

Wisler, C. O., et Brater, E. F., 1959. Hydrology. John Wiley, Chichester, West Sussex, UK

Wyss, A., Contrôle technique des installations de mesures de débits, étalonnage et jaugeage. wRemenieras, G., 1986. L'hydrologie de l'ingénieur. Paris : Eyrolles.

Yebdri, L., Bouanani, A., Harek, Y., Baba-Hamed, K., 2005. Mathematic modelisation of chemicals transports through in the homogeneous porous media in a test ben.ch in the laboratory. Université Abou Beker Belkaïd, BP.119, Tlemcen, Algerie, p., 167.

#### **Liste des sites web:**

[http://www.orleans.inra.fr/les\\_unites/ur\\_science\\_du\\_sol/equipements/simulateur\\_de\\_pluie](http://www.orleans.inra.fr/les_unites/ur_science_du_sol/equipements/simulateur_de_pluie)

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html>

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html>

[http://www.whycos.org/fck\\_editor/upload/File/Volta-pdfs/mesure\\_debits\\_ADCP.pdf](http://www.whycos.org/fck_editor/upload/File/Volta-pdfs/mesure_debits_ADCP.pdf)

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html>

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre11/chapitre11.html>

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre10/chapitre10.html>

[http://www.riiad.net/IMG/pdf/1-\\_Titre\\_et\\_introduction.pdf](http://www.riiad.net/IMG/pdf/1-_Titre_et_introduction.pdf)

<http://www.grese.ch/Document/Docu/debit.pdf>

<http://www.mpl.ird.fr/divha/otool/tarage/guide/meth/m4.htm>

