

**INRA**

Institut National de la Recherche Agronomique

UNITE DE SCIENCE DU SOL  
Site Agroparc  
Domaine Saint-Paul  
84914 AVIGNON Cedex 9

# AUTOMATISATION D'UN LYSIMETRE

## RAPPORT DE STAGE :1998-1999

Rédigé par :Aziz ESSAHBI



Institut Universitaire de Technologie Saint-Jérôme  
Université de AIX-MARSEILLE III  
Département de MESURES PHYSIQUES  
142, traverse Charles Susini  
13388 MARSEILLE Cedex 13

## *REMERCIEMENTS*

*Je voudrais avant tout remercier :*

*Messieurs Jean-Claude GAUDU (assistant ingénieur), Stéphane RUY(chargé de recherche) et Alain ORIOL (technicien de la recherche) qui m'ont accompagné tout au long de mon stage, pour leur accueil, leur disponibilité, leurs informations et leurs conseils.*

*Ensuite mes remerciements vont à Monsieur Laurent BRUCKLER, directeur de recherche de l'unité de science du sol, pour m'avoir accueilli au sein de son unité ; ainsi qu'à tout le personnel pour sa sympathie.*

*Et enfin, je remercie également les professeurs du département Mesures Physiques de l'Institut Universitaire de Technologie Saint-Jérôme de MARSEILLE.*

# **SOMMAIRE**

<b><u>INTRODUCTION</u></b>	p. 1.
<b><u>I.ENTREPRISE</u></b>	p. 2.
<b><u>I.1.L'INRA</u></b>	p. 3.
<b><u>I.1.1.Historique</u></b>	p. 3.
<b><u>I.1.2.Organisation</u></b>	p. 3.
<b><u>I.1.3.Missions</u></b>	p. 3.
<b><u>I.1.4.Moyens</u></b>	p. 4.
<b><u>I.2.Le centre d'Avignon</u></b>	p. 4.
<b><u>I.3.L'unité de science du sol d'Avignon</u></b>	p. 4.
<b><u>II.LE PROJET</u></b>	p. 5.
<b><u>II.1.Définition et objet de la lysimétrie</u></b>	p. 5.
<b><u>II.1.1.définition</u></b>	p. 5.
<b><u>II.1.2.La méthode lysimétrique</u></b>	p. 6.
<b><u>II.2.Présentation du projet</u></b>	p. 8.
<b><u>III.MATERIEL ET METHODE</u></b>	p. 8.
<b><u>III.1.Choix matériel</u></b>	p. 8.
<b><u>III.1.1.Le matériel de mesure</u></b>	p. 8.
<b><u>III.1.2.Le matériel d'acquisition de données</u></b>	p.10.
<b><u>III.1.3.Spécification du capteur de pression</u></b>	p.10.
<b><u>III.1.4.Précision de déclenchement des détecteurs de niveau</u></b>	p.10.

<u>III.2.Principe de la simulation</u>	p. 10.
III.2.1. <u>L'hydrogramme expérimental</u>	p. 11.
III.2.2. <u>L'hydrogramme modèle</u>	p. 11.
III.2.3. <u>Les différentes étapes de la simulation</u>	p.12.
<u>IV.RESULTATS</u>	p.15.
IV.1. <u>Le capteur de pression</u>	p. 15.
IV.1.1. <u>Relation avec la température</u>	p.15.
IV.1.2. <u>Dérive temporelle</u>	p.15.
IV.1.3. <u>Conclusion</u>	p.16.
IV.2. <u>Les détecteurs de niveau</u>	p.16.
IV.2.1. <u>Répétabilité de déclenchement</u>	p.16.
IV.2.2. <u>Conséquences sur les volumes</u>	p.17.
IV.3. <u>Les récipients</u>	p.17.
IV.3.1. <u>Le récipient cylindrique</u>	p.18.
IV.3.2. <u>Le récipient conique</u>	p.19.
IV.4. <u>La simulation</u>	p.21.
IV.4.1. <u>Influence du temps de retour de table</u>	p.21.
IV.4.2. <u>Influence de la hauteur de basculement</u>	p.24.
IV.4.3. <u>Influence de la forme des récipients</u>	p.26.
IV.4.4. <u>Conclusion partielle</u>	p.27.
<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	p.28.

## **INTRODUCTION**

Dans l'étude des transferts d'eau dans le sol, les physiciens se heurtent fréquemment à des difficultés de mesure des variations de stock d'eau ainsi qu'à l'analyse quantitative et qualitative des flux transférés à travers une couche de sol.

Une des solutions techniques d'observation directe consiste à placer dans un terrain expérimental une cuve remplie d'un sol (cuve lysimétrique) ayant subi un itinéraire technique et des conditions climatiques identiques à ceux de la culture environnante. On peut accéder aux variations du stock d'eau contenu dans le volume de sol délimité par la cuve par des pesées régulières de cette dernière dans des phases d'apport d'eau (par la pluie ou les irrigations) ou d'évapotranspiration. Il est également possible de mesurer et de récupérer l'eau filtrée au cours d'un événement pluvieux et de procéder à l'analyse de sa composition chimique. Cette dernière voie d'observation reste peu explorée jusqu'à présent.

L'INRA, Institut National de Recherche Agronomique, où j'ai effectué mon stage, dispose d'une telle cuve équipée d'un dispositif de pesage. Celle-ci n'est cependant pas équipée pour l'instant de système de mesure et de prélèvement des écoulements.

Mon travail consiste à participer à la mise au point d'un dispositif automatique de mesure et de prélèvement des écoulements et plus particulièrement à proposer un choix d'appareils qui tiennent compte des nombreuses contraintes techniques telles que les contraintes de fiabilité, de précision de la mesure et de robustesse car le dispositif sera peu accessible. On veut obtenir un hydrogramme, c'est à dire l'évolution du débit drainé au cours du temps, ce qui nous renseignera sur les mécanismes du transfert d'eau dans le sol sous-jacent, et faire des prélèvements en vue d'analyser l'évolution des concentrations des différentes espèces chimiques afin de prendre en considération les problèmes de pollution des nappes souterraines par les produits de l'agriculture (nitrates, pesticides...etc.).

Ce rapport est constitué de quatre parties: Après la présentation de l'entreprise et de l'unité de sciences du sol dans laquelle j'ai effectué mon stage, je détaillerai le projet. Puis dans une troisième partie, je présenterai le matériel et la méthode que nous avons utilisé. Ensuite j'analyserai les résultats de notre étude. Pour terminer, nous verrons les perspectives de cette étude.

## **I.PRESENTATION DE L'ENTREPRISE**

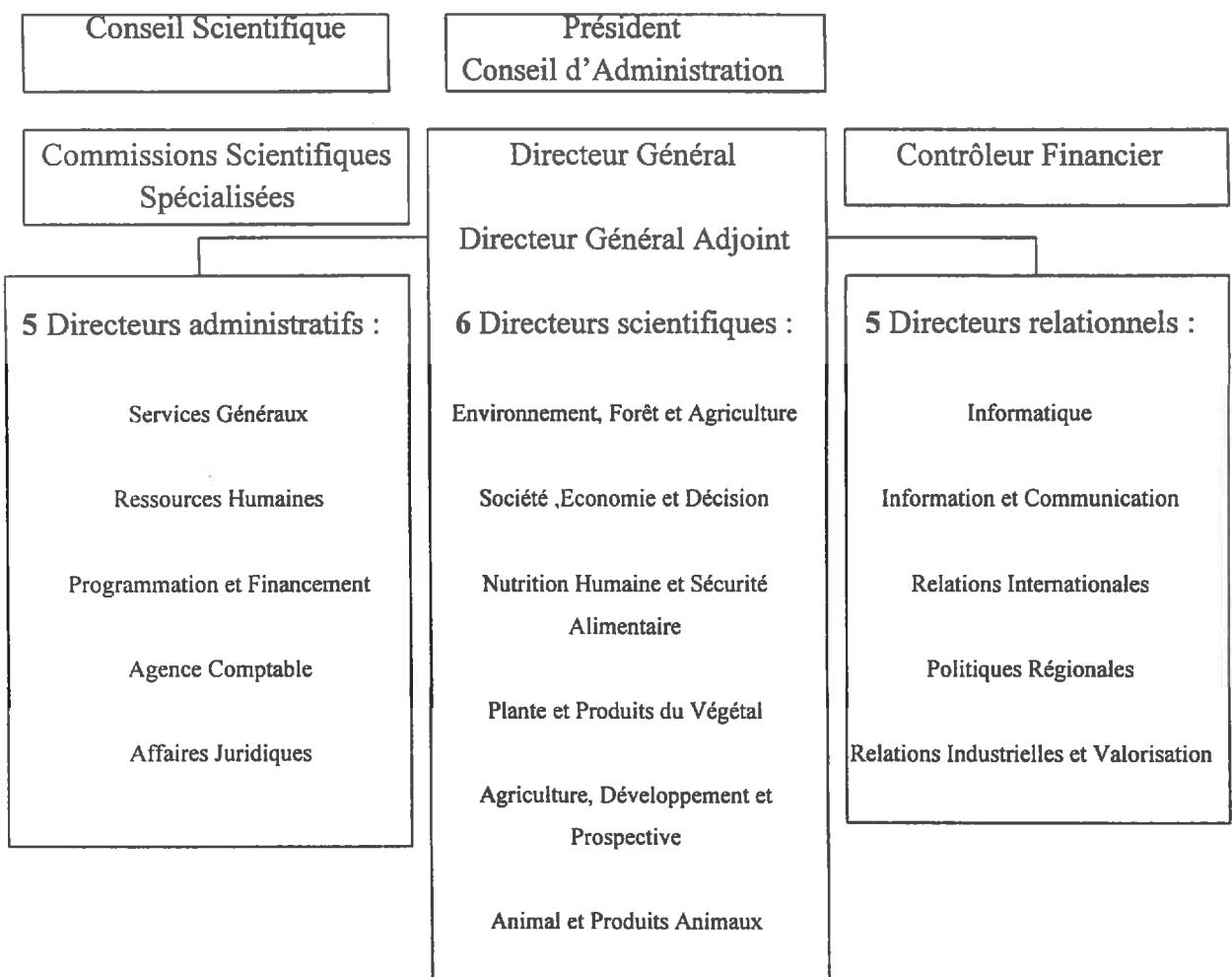
### **I.1.L'INRA**

#### **I.1.1.Historique**

L’Institut National de Recherche Agronomique a été créé en 1946. C'est alors un Etablissement Public à caractère Administratif (EPA), placé sous l'autorité du ministère de l’Agriculture, qui a vocation à organiser, exécuter et publier tous les travaux de recherche relatifs à l’amélioration et au développement des productions végétales et animales. En 1984 l’INRA est transformé en Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST), placé sous la double tutelle des ministères chargés de l’Agriculture et de la Recherche. En 1998 l’Institut subit une réforme avec pour objectif : favoriser une politique d’ouverture et de collaboration. Cette réforme s’est traduite par une autonomie plus grande accordée aux unités et aux départements dans la mise en place et la réalisation des politiques de recherche.

#### **I.1.2.Organisation**

L’INRA est dirigé d’une part par le conseil d’administration, à la tête duquel se trouve le Président, et d’autre part par le Directeur Général. Le Président, avec l’aide des hauts conseillers , assure les relations avec l’extérieur et les différents ministères dont l’institut dépend. La direction générale s’occupe, quant à elle, de gérer trois groupes de direction : direction scientifique (dont l’unité de science du sol dépend), direction relationnelle, direction administrative (cf. figure 1). L’INRA se décompose en 21 centres de recherche regroupant les unités de recherche, les unités expérimentales, les services.



*Figure 1: Organigramme de la direction de l'INRA*

### I.1.3. Missions de l'INRA

Les missions de l'INRA sont définies dans le décret du 14 décembre 1984. En voici les principaux termes :

- Organiser et exécuter la recherche scientifique intéressant l'agriculture et les industries qui y sont liées,
- Publier et diffuser les résultats de ses travaux,
- Effectuer des expertises dans son champ de compétences...etc.

Dans le domaine de la recherche ses missions incluent notamment :

- L'inventaire des ressources du milieu physique (sol, microclimat et réserves hydriques) et l'étude de leur exploitation ,
- L'amélioration des productions animales et végétales,
- L'agro-alimentaire,
- La protection, la gestion et la sauvegarde des ressources naturelles et de l'espace rural,
- Les biotechnologies concernant l'agriculture,
- La production d'énergie ou de molécules par le développement de cultures spécifiques,

#### I.1.4. Moyens

L'INRA dispose de 8600 personnes (dont 3700 chercheurs et ingénieurs) et d'environ trois milliards de francs (87% financés par l'état et 13% provenant de ses propres ressources) répartis sur 21 centres régionaux, pour la réalisation de ses travaux.

#### I.2. Le centre d'Avignon

Il a été créé en 1953 sur le domaine St-Paul, à Montfavet dans la banlieue avignonnaise et il s'est étendu au domaine St-Maurice en 1957, puis au domaine des Vignières en 1976. Il compte à ce jour plus de 20 stations sur une superficie d'environ 80 hectares. L'effectif avoisine les 550 personnes.

Les spécialisations scientifiques et agronomiques se rapportent presque exclusivement aux productions végétales et les domaines d'application des recherches concernent principalement :

- Les productions légumières,
- Les productions fruitières,
- La forêt et les activités agro-sylvo-pastorales en région méditerranéenne,
- L'étude du milieu physique.

#### I.3. L'unité de science du sol

L'unité de science du sol fait partie de la direction scientifique environnement, forêt et agriculture (EFA). Elle regroupe 25 agents permanents dont 10 chercheurs, 4 ingénieurs et 7 à 10 thésards selon les années. L'activité dominante de l'unité est la modélisation des transferts dans le sol et le couplage avec les processus biogéochimiques. Elle est structurée en 2 équipes de recherche. Les enjeux et les applications de ses travaux concernent les problèmes d'environnement (gestion des ressources en eau, pollution des nappes, caractéristiques et évolution géochimique de la solution du sol, émission gazeuse et qualité de l'air,...etc.).

Deux caractéristiques principales de l'activité de l'unité peuvent être soulignées:

- Sur le plan des outils de la recherche, l'activité du laboratoire est caractérisée par un recours important à la modélisation mathématique. Le but est d'obtenir des modèles prédictifs et pas seulement capables de reproduire ou d'être calés sur une expérience donnée.
- Les échelles spatiales de travail vont de l'agrégat ou de la colonne de sol pour des recherches s'attachant à l'analyse de mécanismes locaux, à la parcelle agricole, voire au bassin versant ou à la petite région.

L'unité s'est dotée, en 1994, d'un Laboratoire de Métrologie dont la vocation est de mettre au point de nouvelles techniques de mesures, d'en favoriser éventuellement la diffusion à différentes échelles et d'en maîtriser la qualité et la fiabilité. Cette activité a la possibilité de s'appuyer sur un atelier de réalisation mécanique propre à l'unité.

## II.LE PROJET

### II.1.Définition et objet de la lysimétrie

#### II.1.1.Définition

Dans de nombreuses études on a besoin de connaître les termes du bilan hydrique sur une parcelle agricole et de savoir comment se répartit l'eau apportée par la pluie ou l'irrigation. Le bilan hydrique est un bilan de masse, appliqué à l'eau, effectué sur une épaisseur donnée de sol pendant une durée  $\Delta t$ .

Il s'écrit:

$$\Delta S(t, t + \Delta t) = V \text{ entrant} (t, t + \Delta t) - V \text{ sortant} (t, t + \Delta t)$$

où

$\Delta S$  est la variation de la quantité d'eau stockée sur une épaisseur de sol,  
 $V$  entrant est la somme des volumes d'eau entrant dans l'épaisseur de sol,  
 $V$  sortant est la somme des volumes d'eau sortant de l'épaisseur de sol.

Tous les volumes sont exprimés en mm:  $\Delta S = 1$  mm correspond à une augmentation du volume d'eau stocké de 1 l par  $m^2$ .

En considérant que tous les flux sont verticaux, on a (voir figure 2):

$$V \text{ entrant} = P + I$$

$$V \text{ sortant} = R + D + ETR$$

Où

$P$  = pluie

$I$  = irrigation

$R$  = ruissellement à la surface du sol

$D$  = drainage au bas du profil de sol

$ETR$  = évapotranspiration réelle, qui représente la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la culture.

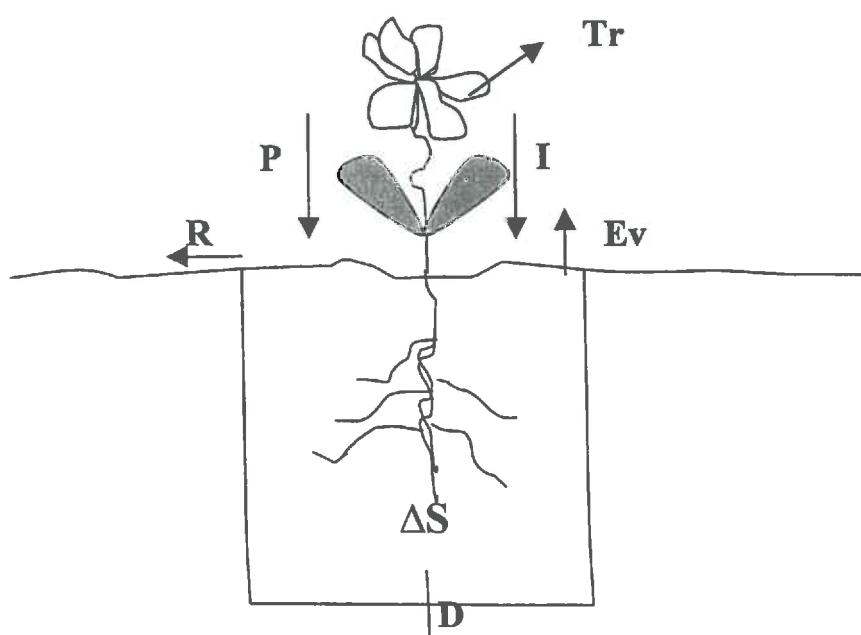


Figure 2:les différents termes du bilan hydrique

Pour étudier les différents termes du bilan une des solutions consiste à placer une cuve de grande profondeur dans laquelle on va reproduire les conditions de travail et de cultures environnantes. Cette cuve est appelée lysimètre. La face supérieure de cette cuve est exposée à l'action des agents atmosphériques, alors que les faces latérales imperméables empêchent tout échange avec l'extérieur. La face intérieure, drainée, permet à l'expérimentateur de recueillir les eaux drainées et de déterminer les caractéristiques moyennes de la solution évacuée par drainage.

### **II.1.2. La méthode lysimétrique:**

La méthode lysimétrique a pour objet de réaliser un bilan entrées-sorties des composés minéraux ou organiques et de l'eau sur une colonne verticale de sol. En conséquence, les transferts verticaux de la solution évacuée seront seuls pris en compte et son champ d'action sera limité à la couche meuble de l'espace naturel où poussent les plantes, c'est à dire la zone racinaire se développant dans la majorité des cas dans les deux premiers mètres du sol.

Les lysimètres ont été initialement utilisés pour déterminer le terme ETR à partir du bilan hydrique, les autres termes étant connus. Ce terme représente les besoins en eau des cultures et permet donc le dimensionnement des réseaux d'irrigation. Dans cette optique seul le recueil du volume drainé cumulé est nécessaire. On obtient les termes  $P + I$  en disposant un pluviographe à la surface du sol. Le terme variation du stock d'eau ( $\Delta S$ ) est obtenu par pesée de la cuve. Le fond de la cuve est équipé d'un dispositif de recueil des flux d'eau de drainage. On suppose que le terme  $R = 0$  (il suffit de faire dépasser les bords de la cuve).

Deux exemples de lysimètres sont donnés en figures 3 et 4.

Les exigences auxquelles les dispositifs de mesure devraient pouvoir satisfaire sont au nombre de deux : permettre des mesures fiables, avec une perturbation minimale du sol et pouvoir être installés en parcelle cultivée sans gêne pour les pratiques agricoles car un des impératifs de la lysimétrie est la longue durée.

Les lysimètres en figures 3 et 4 sont des dispositifs lourds et nécessitent de grands aménagements dans la zone où ils sont implantés.

Enfin, les lysimètres peuvent avoir un autre objectif que l'objectif appliqué précédemment: en suivant avec un pas de temps régulier ( $< 1$  min.) les volumes d'eau drainés, on peut en déduire les mécanismes du transfert d'eau dans le sol. Si en plus on suit la qualité chimique (quelles sont les espèces chimiques présentes et en quelles concentrations ?) de l'eau de drainage, on pourra également faire des diagnostiques sur l'impact environnemental des cultures (pollution des nappes souterraines).

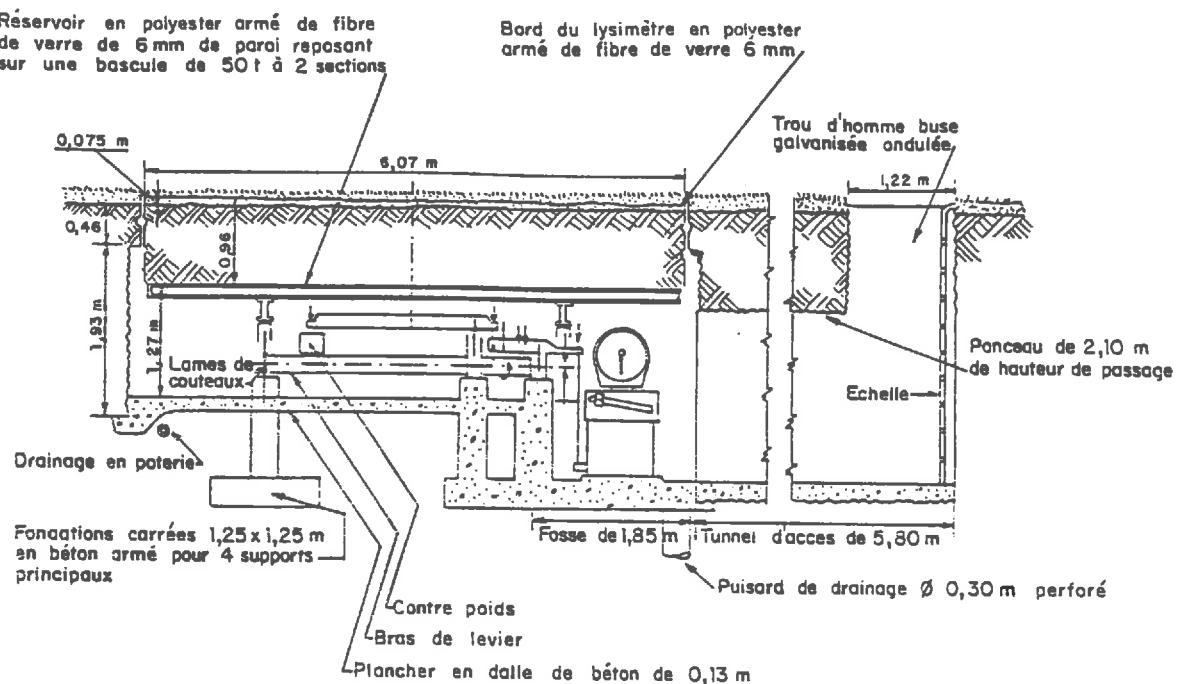


Fig.3 Lysimètre pesable utilisé à Davis, Californie  
(Pruitt et Angus 1960)

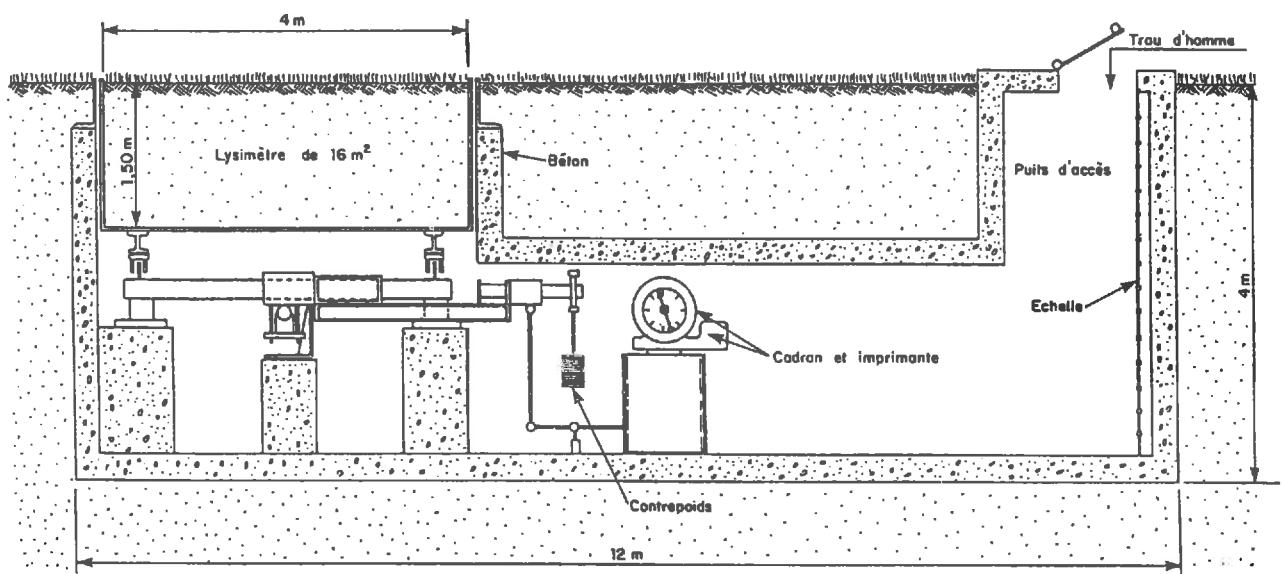


Fig.4 Lysimètre pesable de précision de Tal-Amara, Liban

## **II.2. Présentation du projet**

Mon travail s'insère dans le deuxième objectif et consiste à participer à l'automatisation d'un dispositif de prélèvement et de mesure des écoulements et à sa mise au point. Ce dispositif doit, d'une part permettre de restituer des hydrogrammes de drainage (volume d'eau écoulé en fonction du temps) et d'autre part permettre le prélèvement des filtrats pour analyse ultérieures. Il doit fonctionner pour des régimes pluvieux extrêmement variables tels qu'on les rencontre en climat méditerranéen. Les dispositifs présentés en figures 3 et 4 sont des dispositifs lourds et ne peuvent pas être implantés sur des dispositifs expérimentaux existants. L'INRA dispose d'une cuve lysimétrique de 2,60 m de diamètre et 1,20 m de profondeur avec son dispositif de pesage

## **III. MATERIEL ET METHODE**

### **III.1. Choix matériel**

Au cours du stage nous nous sommes particulièrement intéressés à la restitution d'un hydrogramme de drainage. Pour cela, on envisage de recueillir l'eau dans deux récipients distincts : l'un étant vidé pendant le remplissage de l'autre. On dispose d'un capteur de pression dans chaque récipient, ce qui nous permet de suivre l'évolution de la quantité d'eau drainée dans les récipients. Dans chacun de ces récipients on place également trois détecteurs de niveau. Ces derniers ont deux objectifs. Le premier est de déclencher les diverses actions : orientation de l'écoulement d'un récipient vers l'autre à l'aide d'une électrovanne et déclenchement du pompage et des prélèvements d'échantillons pour analyser les espèces chimiques. Le second est de permettre un réétalonnage sur site du capteur de pression. En effet, ces derniers dérivent en température et avec le temps, d'où la nécessité d'un réétalonnage régulier. Ce réétalonnage pourrait se faire au laboratoire, ce qui impliquerait de démonter le dispositif pendant plusieurs jours. Les problèmes soulevés par cette stratégie sont les suivants :

- Le dispositif est peu accessible et son démontage délicat,
- On risque de passer à côté d'un épisode pluvieux intéressant,
- On ne connaît pas les caractéristiques du capteur juste avant le réétalonnage.

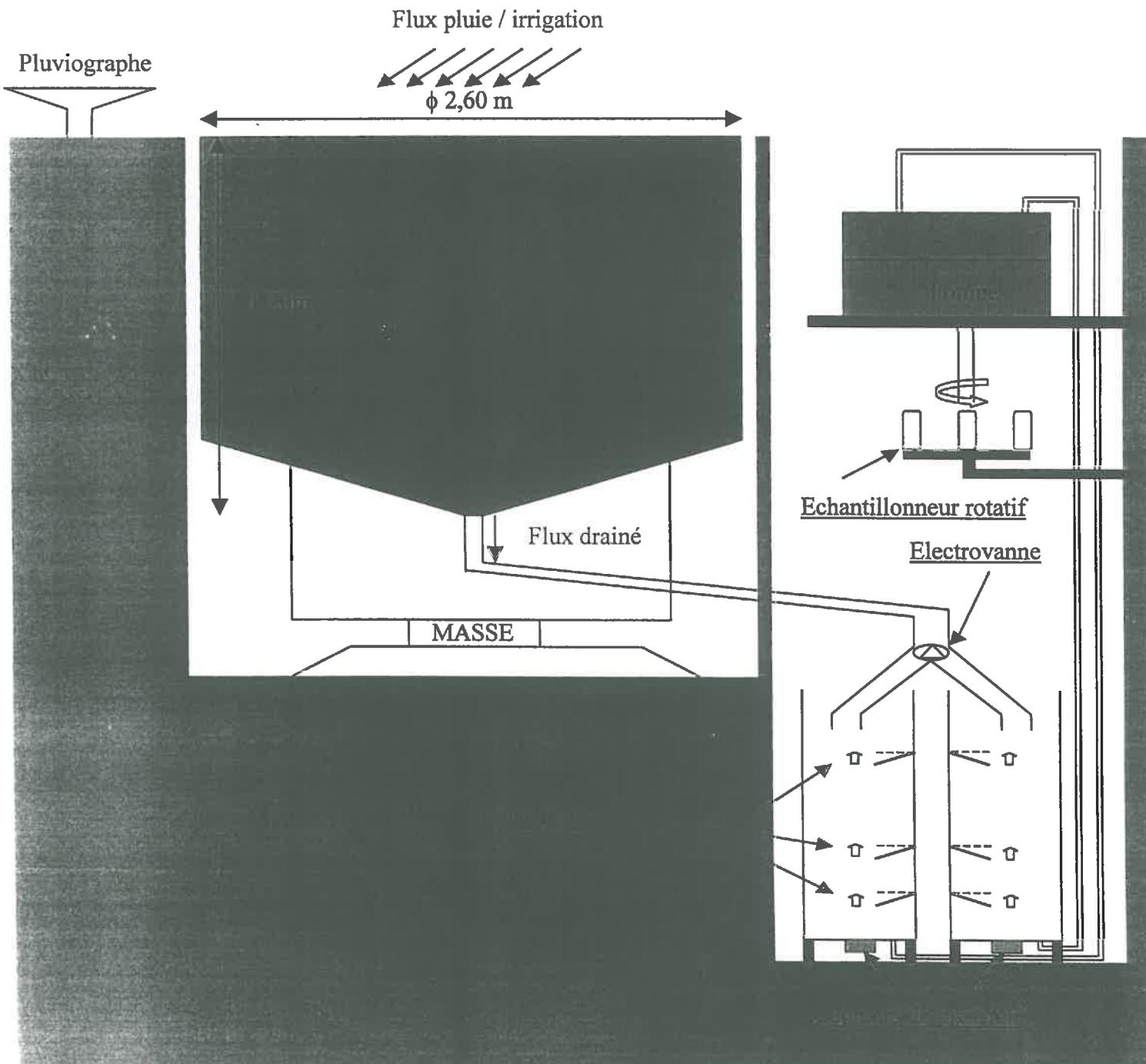
Inversement, un réétalonnage sur site permettrait de s'affranchir de ces problèmes. Il peut se réaliser si on connaît simultanément la hauteur d'eau et le signal du capteur, ce que permettent les détecteurs de niveau qui sont installés à une cote précise.

Le système doit donc permettre l'optimisation des volumes prélevés en fonction de la problématique analytique (volumes nécessaires à l'analyse des différentes espèces chimiques recherchées), et en fonction de l'évolution du régime hydrique au cours de l'événement pluvieux.

### III.1.1. Le matériel de mesure

La cuve lysimétrique doit être reliée à :

- 2 récipients
- 2 capteurs de pression (un dans chaque récipient)
- 6 capteurs de niveaux (3 dans chaque récipient)
- 1 électrovanne (pour orientation de l'écoulement)
- 1 pompe et un échantillonneur rotatif (pour les prélèvements)
- 1 pluviographe



*Figure 5: Dispositif de mesure*

Avec la structure que nous adoptons, nous rencontrons un certain nombre de problèmes qui sont essentiellement liés à :

- La précision des capteurs de pression,
- Leur dérive en fonction de la température,
- Leur dérive dans le temps,
- La précision des détecteurs de niveau.

### III.1.2.Le matériel d'acquisition de données (cf. annexe 1)

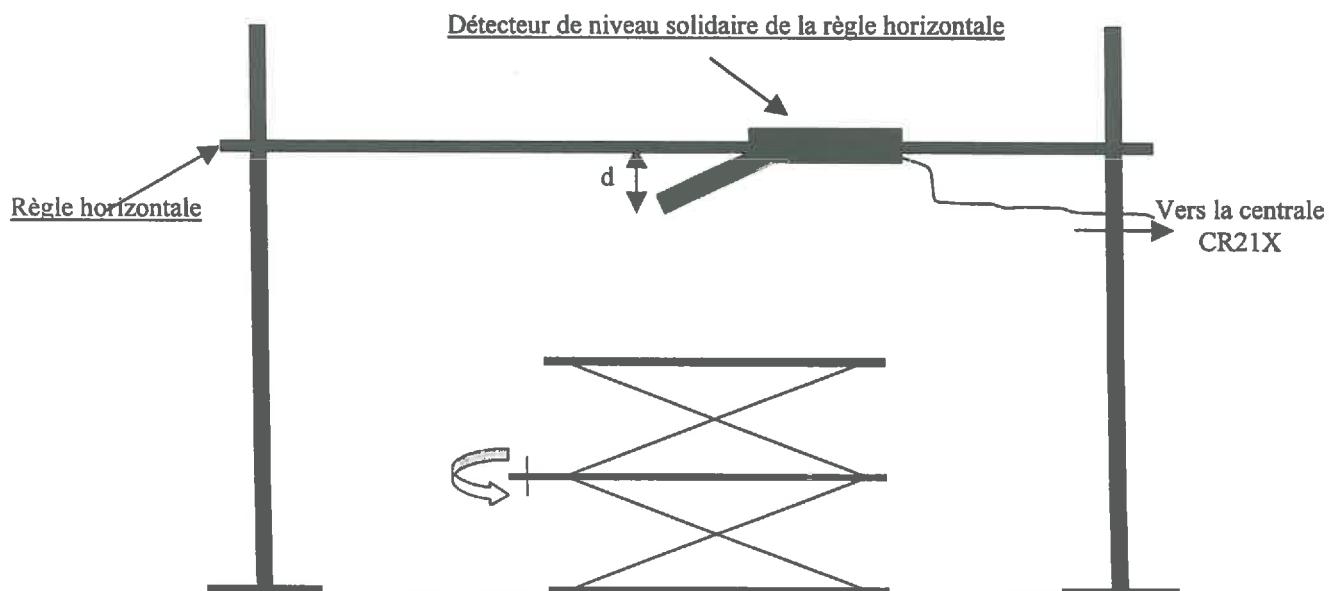
Chacun des appareils de mesure est relié à un système d'acquisition de données : la centrale Campbell 21X. Elle possède 8 voies de mesures et 6 ports de contrôle. Cette centrale est programmable dans un langage qui lui est propre.

### III.1.3.Spécification des capteurs de pression avec la température et le temps (cf. annexe2)

Pour étalonner les capteurs de pression, l'unité de sciences du sol dispose d'une armoire climatique régulée au 1/10<sup>ème</sup> de degré et d'un étalon de pression. Mais en ce qui concerne le stage, j'ai utilisé des capteurs de pression qui ont déjà été utilisés dans les mêmes conditions.

### III.1.4.Précision de déclenchement des détecteurs de niveau

J'ai étudier la régularité et la précision de déclenchement des détecteurs de niveau. Le dispositif est schématisé sur la figure 6.



*Figure 6: Schéma du dispositif utilisé pour déterminer la régularité dans le déclenchement du détecteur de niveau*

Le basculement du capteur de niveau est enregistré par la centrale Campbell (CR21X) grâce à un montage en pont diviseur de tension. Le déroulement de la mesure est le suivant: on fait monter le boy très lentement (succession de quasi-équilibres) jusqu'à ce que la centrale enregistre le basculement du détecteur de niveau. A cet instant, on mesure au pied à coulisse la distance  $d$  entre la règle horizontale et le plateau du boy. La mesure est répétée une vingtaine de fois pour les trois détecteurs de niveau.

### **III.2. Principe de la simulation**

Un programme partiel d'acquisition de données a été réalisé sur la CR21X. Sur la base de ce programme, nous avons estimé que l'intervalle de temps minimal entre deux mesures (ou temps de retour de table = TRT) serait de 10s. Ce pas de temps induire un décalage entre le moment où l'eau passe effectivement au niveau du détecteur et le moment où la centrale enregistre le basculement ce qui peut nuire à la précision de la procédure de réétalonnage. Ainsi avant la réalisation matérielle d'un prototype et le développement du programme complet d'acquisition, nous avons réalisé une étude par simulation numérique dont les objectifs sont:

1. tester l'effet du TRT sur la reconstitution d'un hydrogramme type,
2. tester l'effet de la forme du récipient,
3. tester l'emplacement des détecteurs de niveau.

#### **III.2.1. L'hydrogramme théorique:**

L'hydrogramme théorique a été obtenu après ajustement par morceaux d'une fonction mathématique aux données issues d'un hydrogramme expérimental. Celui-ci a été obtenu par un opérateur manuel qui recueillait dans des flacons différents et à intervalle de temps régulier le flux d'eau drainé à la base d'une colonne de sol de petites dimensions ( $h = 1m$ ,  $\phi = 30cm$ ) sous une simulation de pluie de 30 mm/h pendant 2 heures. La durée totale de l'hydrogramme est de 3 heures. L'intégrale du flux donne le volume cumulé. L'hydrogramme expérimental et l'hydrogramme théorique sont donnés sur la figure 7.

Figure 7:

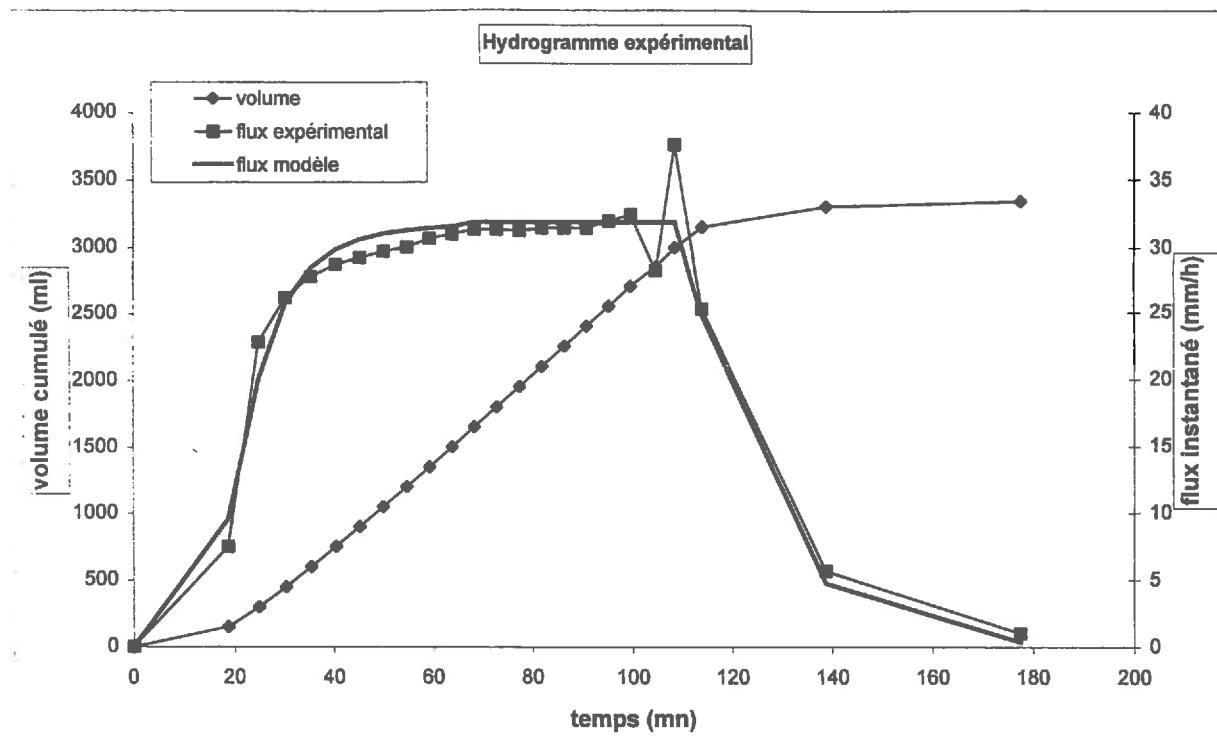


Fig. 7.a.:Hydrogramme expérimental

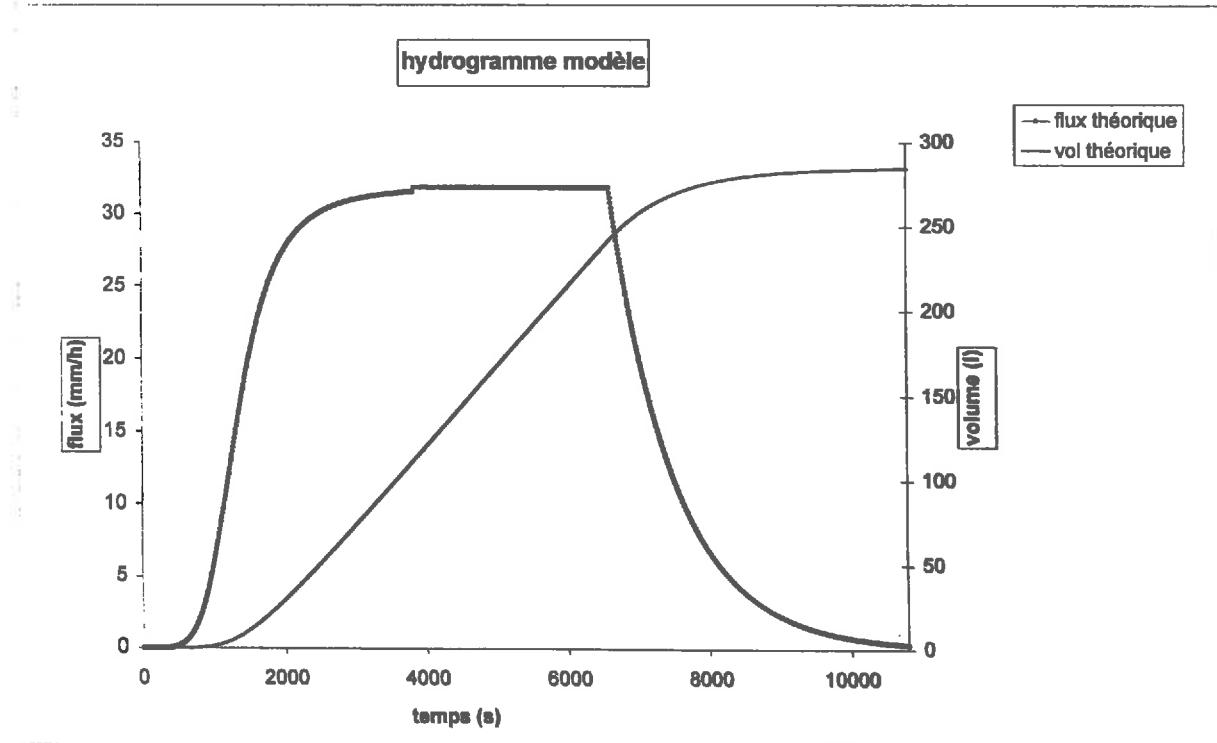


Fig. 7.b: Hydrogramme modèle

### III.2.2. Les différentes étapes de la simulation

Pour faire cette simulation on décide de faire varier 3 facteurs. Ces 3 facteurs sont:

- le temps d'échantillonnage (ou temps de retour de table) (2s ou 10s)
- la forme du récipient (cylindrique ou conique)
- les niveaux de vidange(25cm, 50cm, 100cm)

Le principe est le suivant:

1. Le flux théorique permet de reconstituer l'évolution  $h(t)$  de la hauteur d'eau dans le réservoir en fonction de la forme du réservoir.

2. Connaissant la hauteur  $h(t)$  on calcule le signal théorique du capteur de pression,  $V_{th}(t)$ , avec l'étalonnage initial.

3. Puis on fait un recalibrage automatique lorsque le détecteur de niveau enregistre le passage de l'eau.

4. Ensuite on calcule  $h_{exp}(t)$  avec le nouvel étalonnage.

4. Enfin on reconstitue l'hydrogramme  $q_{exp}(t)$ .

Les équations utilisées sont données ci-dessous:

1. Calcul du débit théorique (l/h):

$$Q_{th} = \pi \cdot R^2 \cdot q_{th}$$

Avec  $R = 1,3$  m (rayon de la cuve lysimétrique)

2. Calcul du volume drainé théorique:

$$V_{th} = \frac{0,5 \cdot \Delta Q \cdot \Delta t}{3600}$$

Avec  $\Delta Q$  = variation de débit  
 $\Delta t$  = intervalle de temps correspondant

On suppose qu'on vide le récipient dès que le détecteurs de niveau change d'état.

3. On calcule une hauteur théorique connaissant la forme du récipient:

- Pour le récipient cylindrique:

hauteur d'eau (cm):

$$h_{continu} = \frac{10 \cdot V_c}{(\pi \cdot r^2)}$$

où  $r$  (cm) = 4 (rayon du récipient cylindrique)

$V_c$  (l) = volume cumulé

- Pour le récipient conique:

Pour passer du volume à la hauteur, il faut inverser la relation:

$$V = \pi/3 * h * (r(h)^2 + r(h) * r0 + r0^2)$$

Donc il faut résoudre une équation du 3<sup>ème</sup> degré de la forme:  
 $h^3 + a1h^2 + a2h + a3 = 0$  et  $a3$  dépend du volume

4. Calcul de la réponse théorique du capteur:

$$Vs \text{ (mV)} = a \cdot h + b$$

$a$  et  $b$  sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine calculées pour une température de 15 °C. Ce sont les coefficients d'étalonnage initiaux du capteur de pression.

5. Procédure de réétalonnage: calcul des nouveaux coefficients d'étalonnage du capteur de pression. Lorsque la centrale détecte le déclenchement du détecteur de niveau (par exemple celui placé à 25cm de hauteur), on suppose que le signal théorique délivré par le capteur de pression correspond à une hauteur d'eau de 25cm. On rappelle que le moment où la centrale détecte le basculement est forcément un multiple du TRT, et donc que le détecteur de niveau a pu basculer plusieurs secondes avant que la centrale ne l'enregistre. Le calcul des nouveaux coefficients se fait par:

$a'$  : pente:

$$a' = \frac{25}{Vs(25\text{cm}) - Vs(0)}$$

$b'$  : ordonnée à l'origine:

$$b' = \frac{-25 \cdot Vs(0)}{Vs(25\text{cm}) - Vs(0)}$$

En utilisant les nouveaux coefficients d'étalonnage, on calcul une hauteur expérimentale  $h_{exp}$ :

$$h_{exp} \text{ (cm)} = a' \cdot Vs + b'$$

Puis on repasse aux volumes expérimentaux cumulés  $V_c$  connaissant la forme du récipient et on endéduit un nouveau flux instantané:

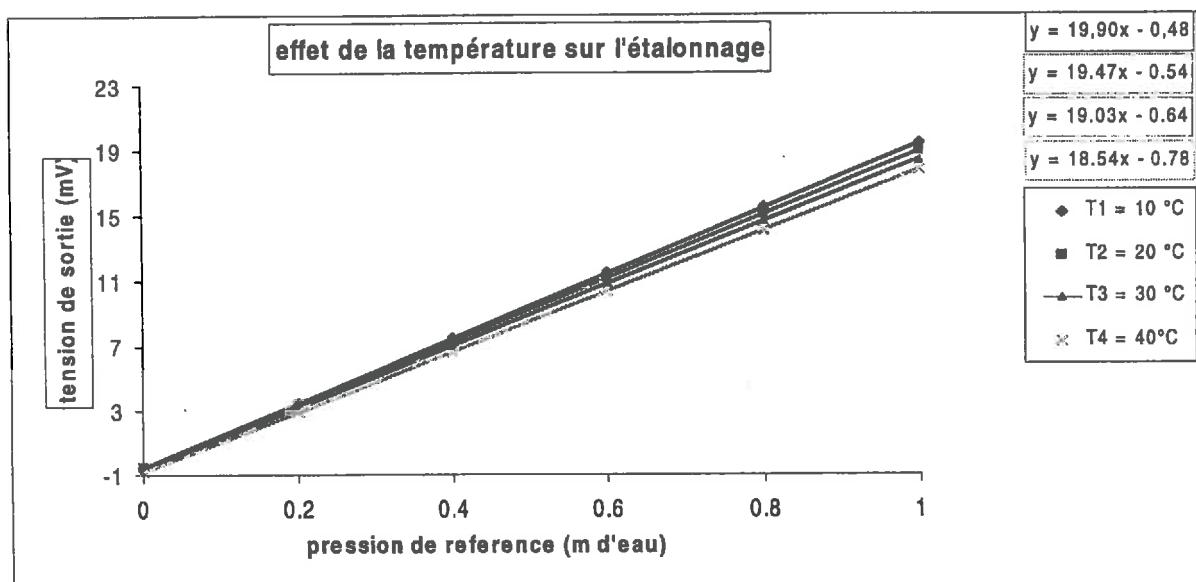
$$q' \text{ (mm/h)} = \frac{\Delta V_c}{\Delta t} \cdot \frac{3600}{\pi \cdot R^2}$$

## IV.RESULTATS

### IV.1.Le capteur de pression

#### IV.1.1.Relation avec la température

on utilise les valeurs données par l'étalonnage de quatre capteurs de pression avec quatre températures: (10°C, 20°C, 30°C, 40°C).  
On obtient le graphique suivant:



#### Sensibilité du capteur de pression à la température

On voit bien que la tension du capteur ne varie pas de la même façon selon la température. L'offset est peu sensible à la température contrairement à la pente

#### IV.1.2.dérive temporelle

Sur une série de 8 capteurs, on a une dérive dans le temps qui peut atteindre 2 à 3cm sur 6 mois.

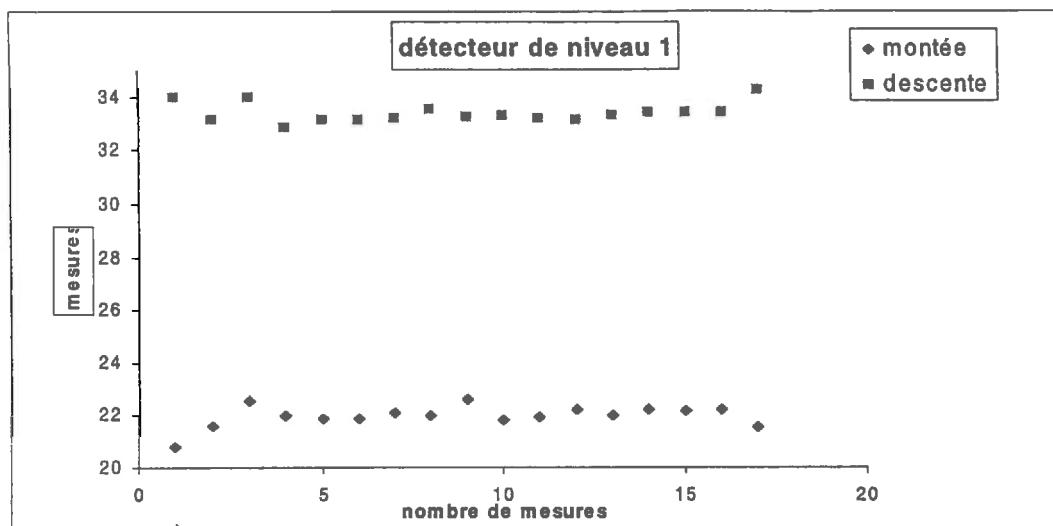
#### IV.1.3.Conclusion

Le capteur de pression dérive dans le temps et en fonction de la température donc notre procédure de réétalonnage permanent est bien valable. Il dérive dans le temps de l'ordre de 5 cm par an et de 2 à 3 cm entre 10°C et 20°C.

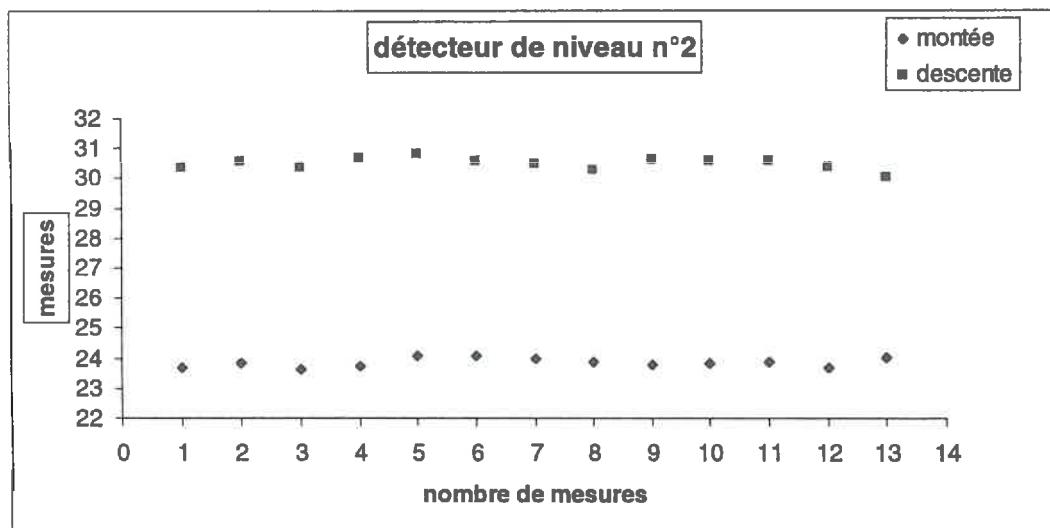
### IV.2.Les détecteurs de niveaux

#### IV.2.1.répétabilité de déclenchement

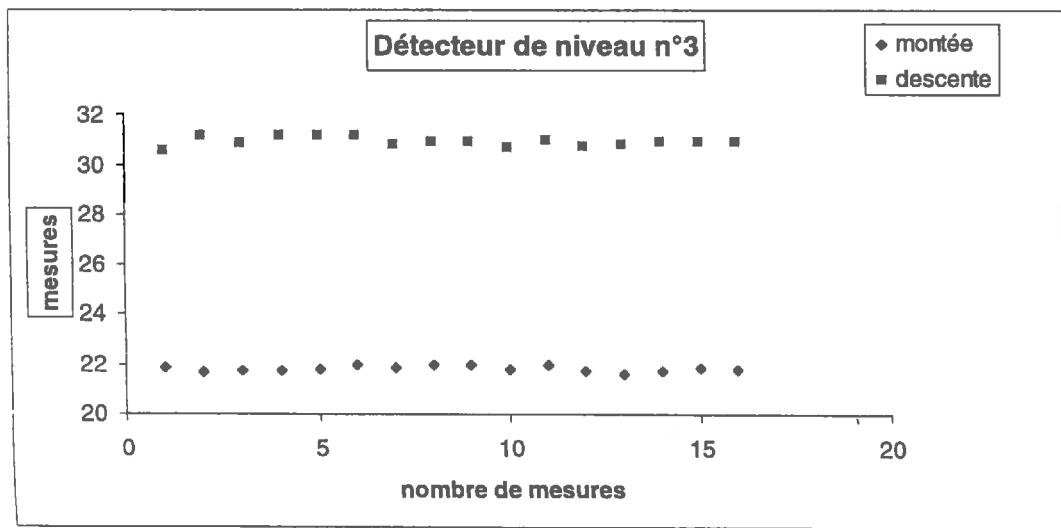
Les résultats sont reportés sur la figure 6 pour les 3 détecteurs de niveau.



*Fig 8 a. Détecteur de niveau n°1*



*Fig. 8 b. Détecteur de niveau n°2*



*Fig. 8 c. Détecteur de niveau n°3*

*Figure 8: répétabilité du basculement des détecteurs de niveau.*

Les résultats sont synthétisés dans les tableaux suivant. A la montée, on a:

	Détecteur n°1	Détecteur n°2	Détecteur n°3
Moyenne	21.94	23.85	21.83
Ecart type	0.41	0.15	0.12

A la descente, on obtient :

	Détecteur n°1	Détecteur n°2	Détecteur n°3
Moyenne	33.40	30.47	30.92
Ecart type	0.37	0.20	0.19

#### IV.2.2.Conséquences sur les volumes

Les détecteurs de niveau que nous utilisons ont une bonne répétabilité. On remarque cependant qu'ils n'enregistrent pas de la même façon la mesure du niveau de l'eau en montée et en descente. Ceci est dû à un phénomène d'hystérésis mais ne risque pas de fausser nos mesures car on n'utilisera que le basculement à la montée.

### IV.3.Les récipients

Nous avons étudié quelle était l'influence de la variabilité du déclenchement du capteur de niveau sur le calcul des volumes pour 2 formes de récipients: cylindrique et conique.

Nous nous sommes intéressé à une forme cylindrique pour des raisons de simplicité. Quant à la forme conique, elle nous a intéressé pour des raisons techniques. En effet, avec un récipient en tronc de cône on pourra récupérer de petits volumes d'eau sur de grandes hauteurs et des volumes plus grands sur des hauteurs moins importantes par rapport à un récipient cylindrique et par conséquent une bonne précision de la mesure des volumes d'eau drainés.

Pour cela, nous avons considéré que le basculement du détecteur était une variable aléatoire de moyenne nulle (centrée sur la cote d'installation de 25cm par exemple) et d'écart type égal à 0.2 pour le détecteur n°2 par ex.. Nous avons alors procédé à un tirage aléatoire de 100 valeurs du basculement et recalculé les volumes d'eau correspondants. Les résultats sont donnés sur les figures 9 abc (cylindre) et 10 abc (cône) et en annexe 4.

#### IV.3.1. Le récipient cylindrique:

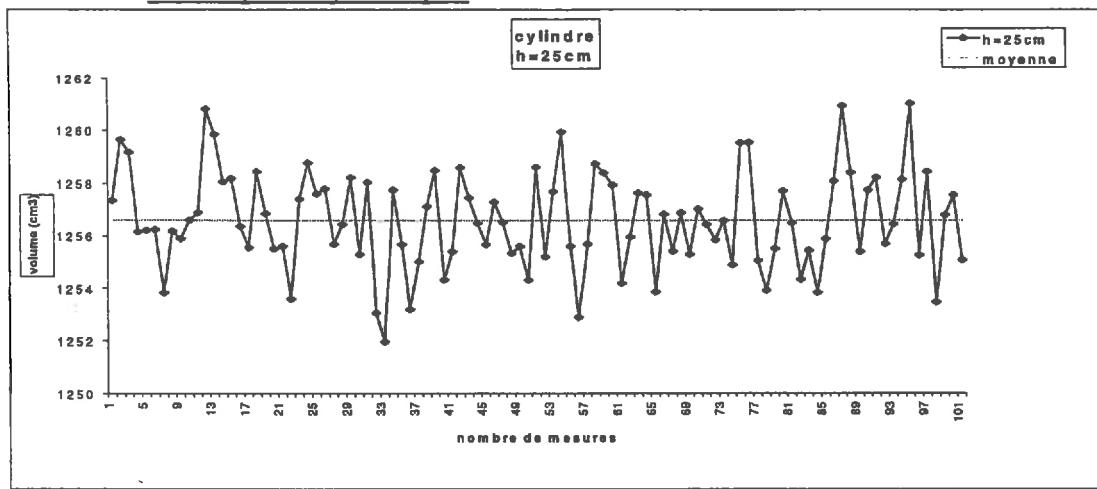


Fig. 9a. Récipient cylindrique,  $h=25\text{cm}$

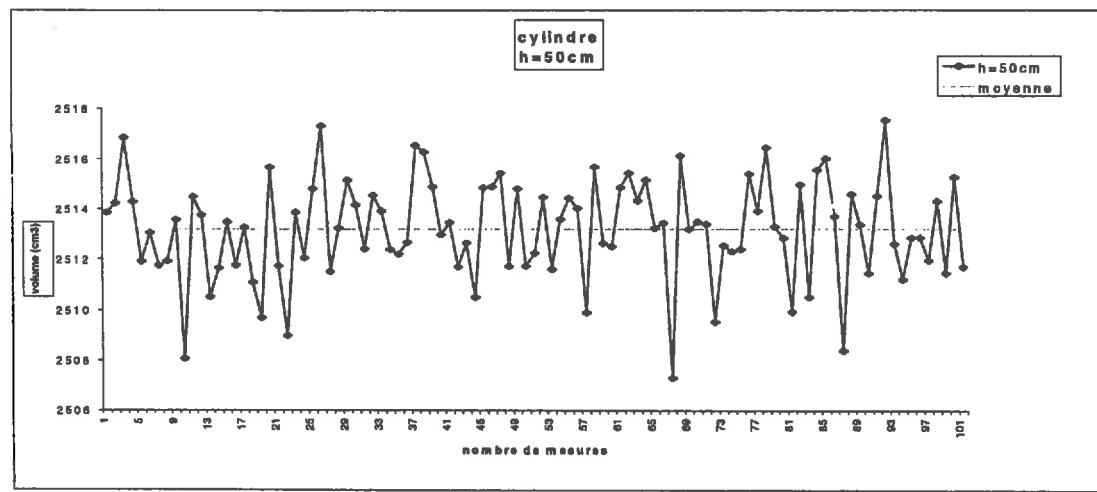


Fig. 9b. Récipient cylindrique,  $h=50\text{cm}$

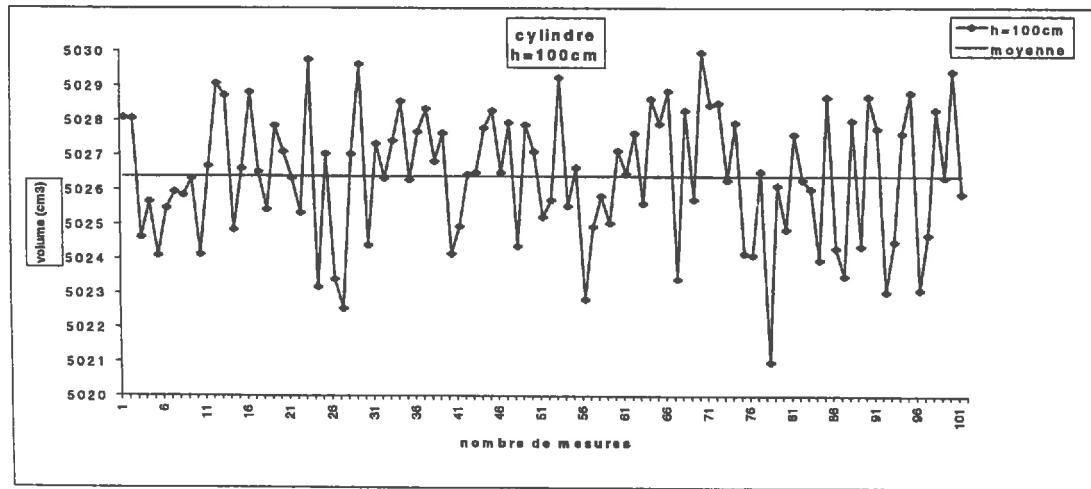


Fig.9c. Récipient cylindrique,  $h=100\text{cm}$

Figure 9 : effet sur le calcul du volume de l'incertitude dans le basculement des détecteurs de niveau (récipient cylindrique)

L'erreur moyenne sur le volume est la différence entre la moyenne des volumes et le volume théorique, le tout divisé par le volume théorique. On obtient 0.7%, 0.4%, 0.15% pour les hauteurs:25cm, 50cm, 100cm. Ces erreurs sont faibles et on a peu de biais.

#### IV.3.2. Le récipient conique:

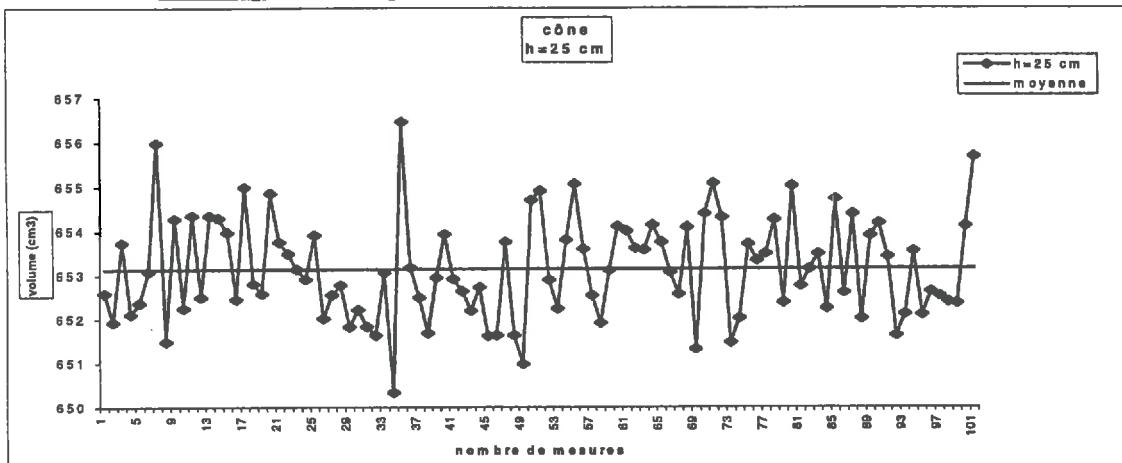


Fig. 10a. Récipient conique,  $h=25\text{cm}$

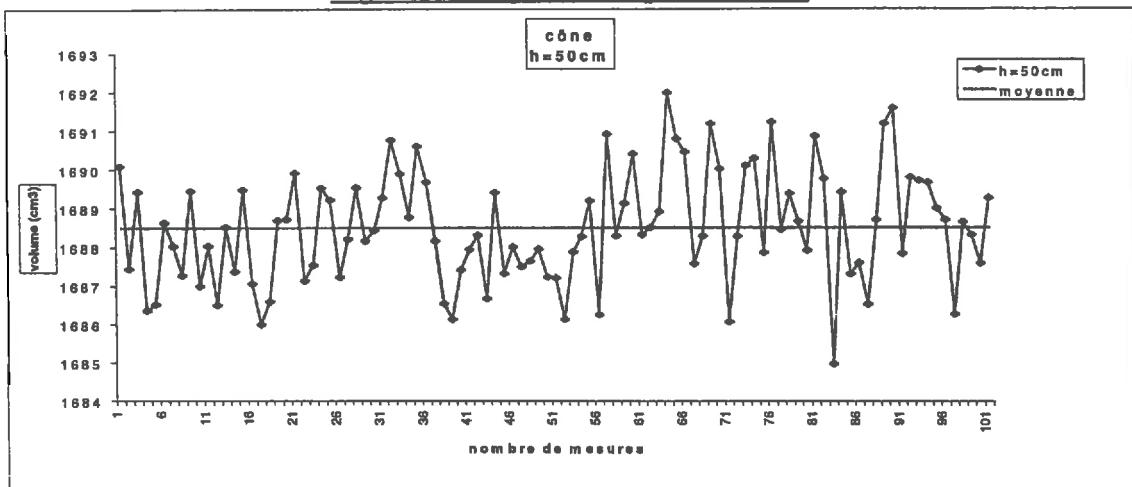


Fig. 10b. Récipient conique,  $h=50\text{cm}$

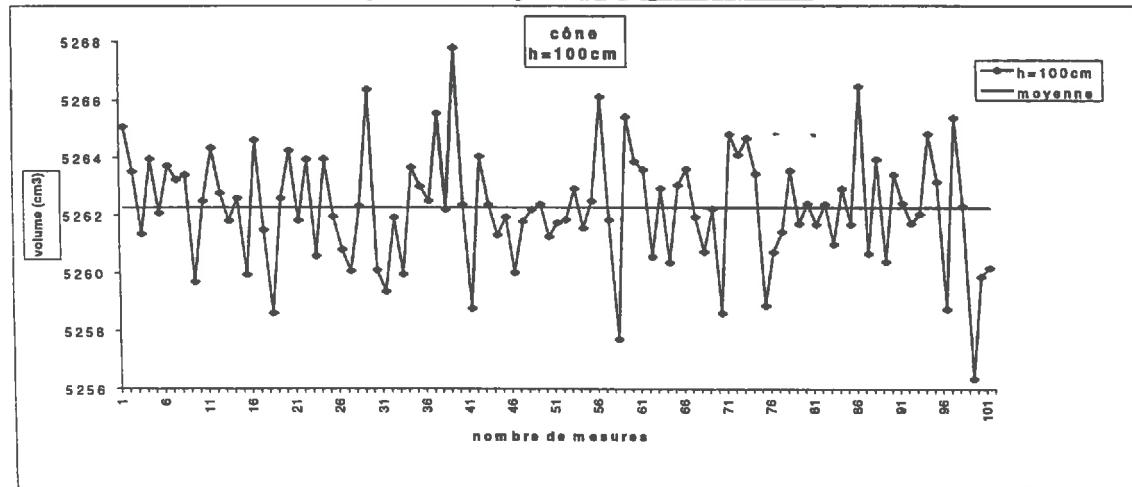


Fig. 10c. Récipient conique,  $h=100\text{cm}$

Figure 10 : effet sur le calcul du volume de l'incertitude dans le basculement des détecteurs de niveau (récipient conique)

On obtient une erreur de mesure de l'ordre de 1%, 0.5%, 0.25% pour les hauteurs 25cm, 50cm, 100cm. Ces valeurs sont plus importantes que pour le récipient cylindrique et on a un biais dû à la forme en tronc de cône. Ceci est dû au fait que pour une même variation en plus ou en moins de la hauteur, on aura, en valeur absolue, une surestimation du volume > à la sous-estimation car la section du récipient augmente avec la côte.

## **IV.4.La simulation**

### **IV.4.1.Influence du temps de retour de table**

Il s'agit de comparer des hydrogramme réalisés pour un récipient cylindrique, avec un temps d'échantillonnage soit de 10s soit de 2s. Dans les deux cas, on suppose qu'on remplit le récipient jusqu'à une certaine hauteur, on a choisi 25 cm (figure 8) et 50 cm (figure 9), puis qu'on le vide.

On a une meilleure restitution de l'hydrogramme pour un temps d'échantillonnage des mesures (ou temps de retour de table) de 2s que pour 10s. Les escaliers que nous observons correspondent aux moments où on vidange les récipients. Ces escaliers sont d'autant plus grands que le temps de retour de table et le débit d'eau sont importants car avec un temps de retour de table de 10s par exemple on peut avoir un retard dans la mesure du niveau de 10s. Ceci entraîne une augmentation du niveau d'eau qui croît avec le débit et au lieu d'enregistrer un niveau d'eau de 25 cm par exemple on va enregistrer 27cm, 28cm voire 30cm. Par conséquent ceci introduit un biais dans le réétalonnage et finalement une sous-estimation non négligeable à la fois du volume cumulé et des flux instantanés.

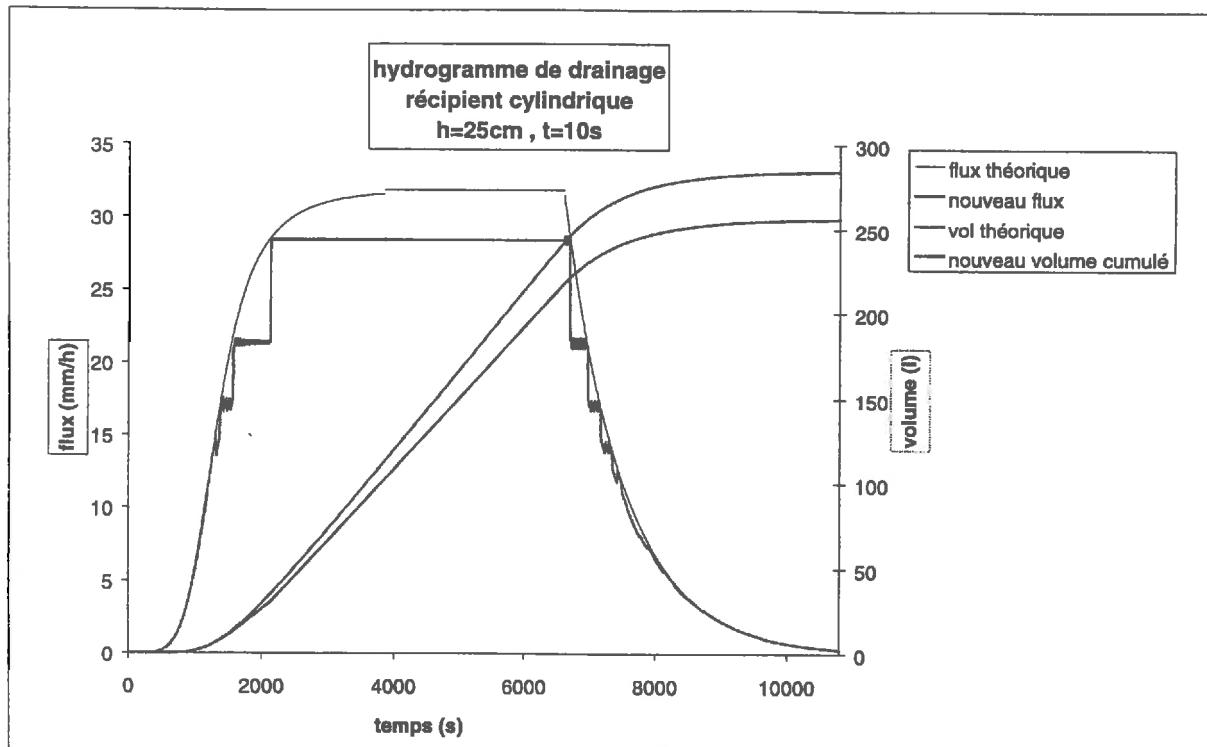


Fig. 11a. Hydrogramme de drainage, récepteur cylindrique,  $h=25\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$

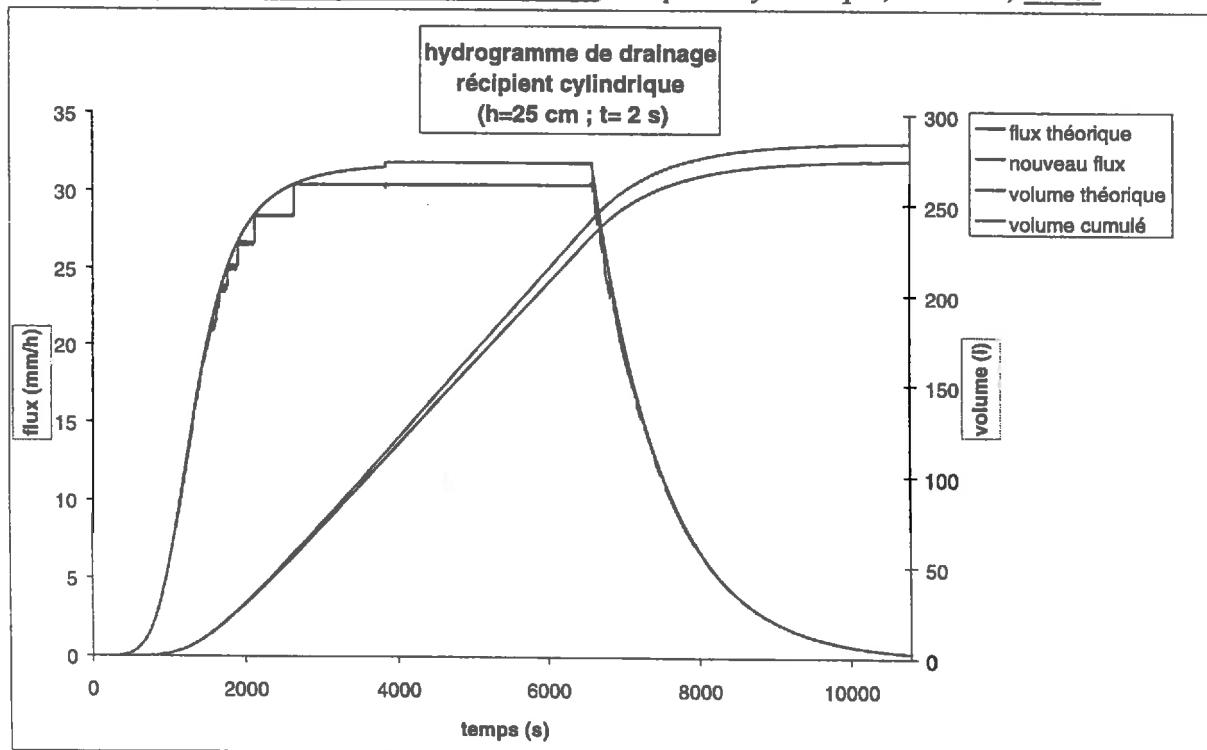
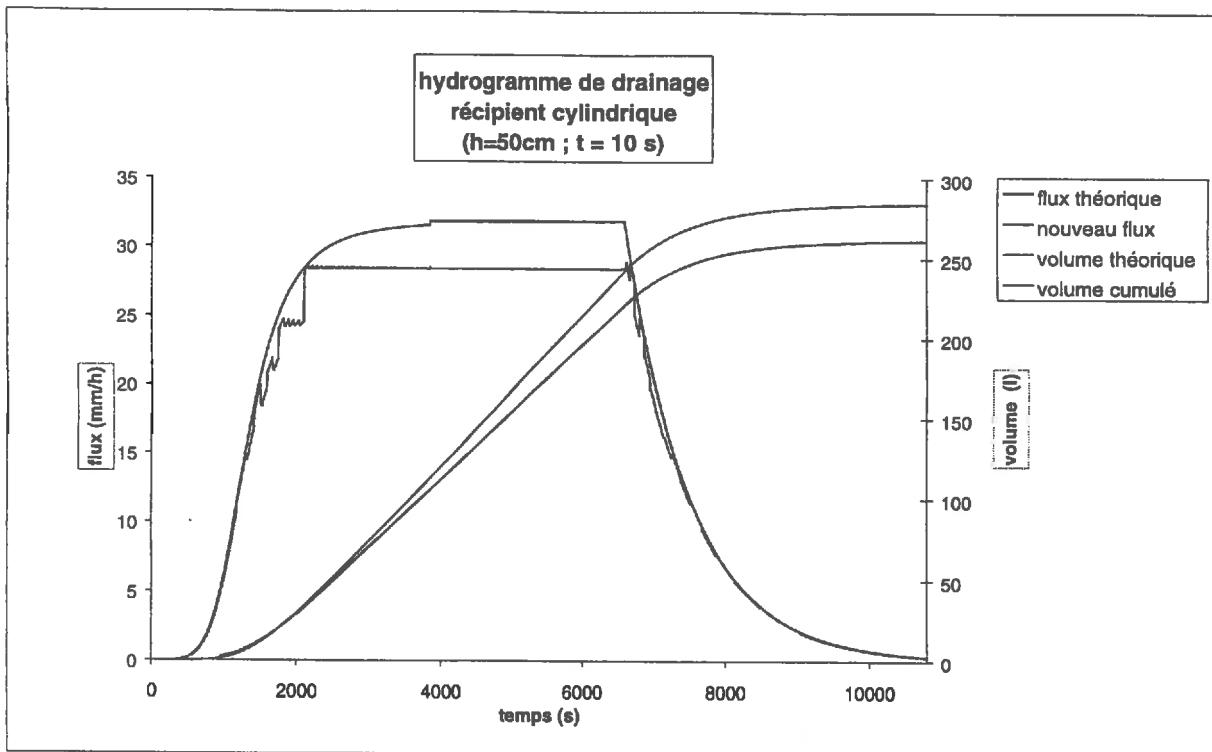
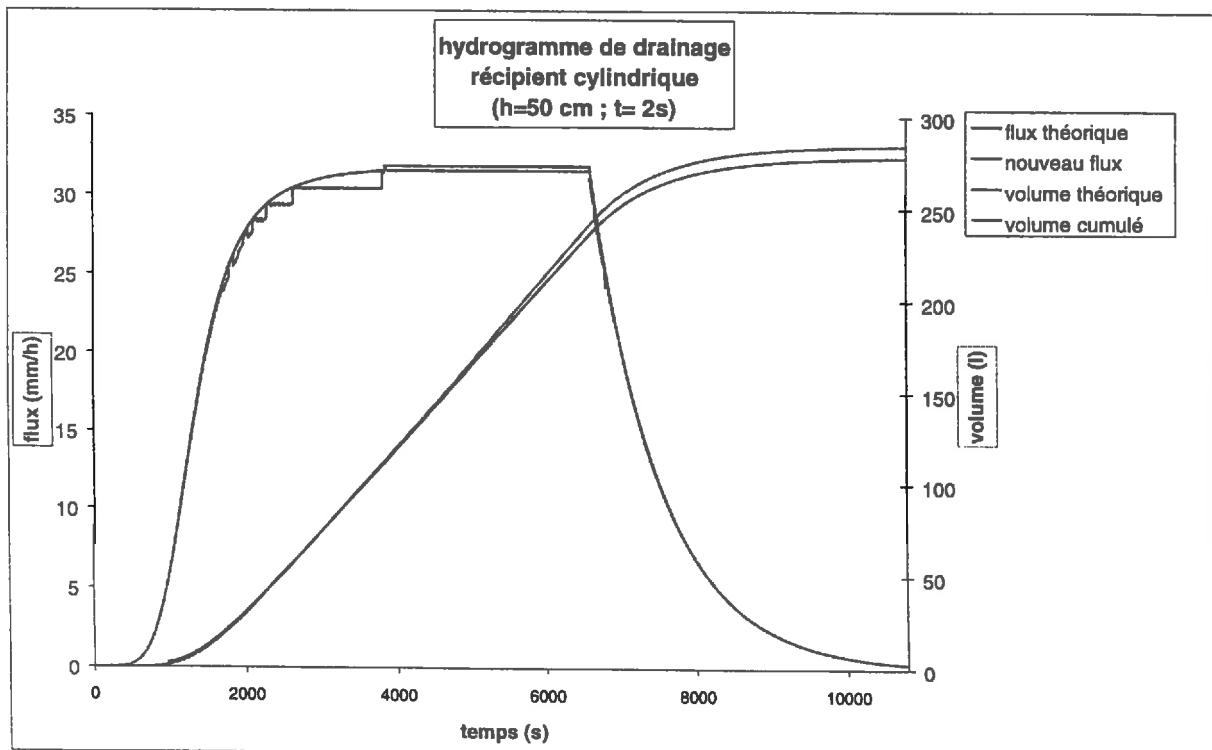


Fig. 11b. Hydrogramme de drainage, récepteur cylindrique,  $h=25\text{cm}$ ,  $t=2\text{s}$



*Fig. 12.a. Hydrogramme de drainage, réciipient cylindrique, h=50cm, t=10s*



*Fig. 12 b. Hydrogramme de drainage, réciipient cylindrique, h=50cm, t=2s*

#### IV.4.2. Influence de la hauteur de basculement

On observe l'effet de la hauteur de basculement en supposant que les détecteurs de niveaux se trouvent à 25 cm, 50 cm et 100 cm. On obtient les hydrogrammes suivants pour un intervalle de temps de 10s (figure 11) et de 2s (figure 12).

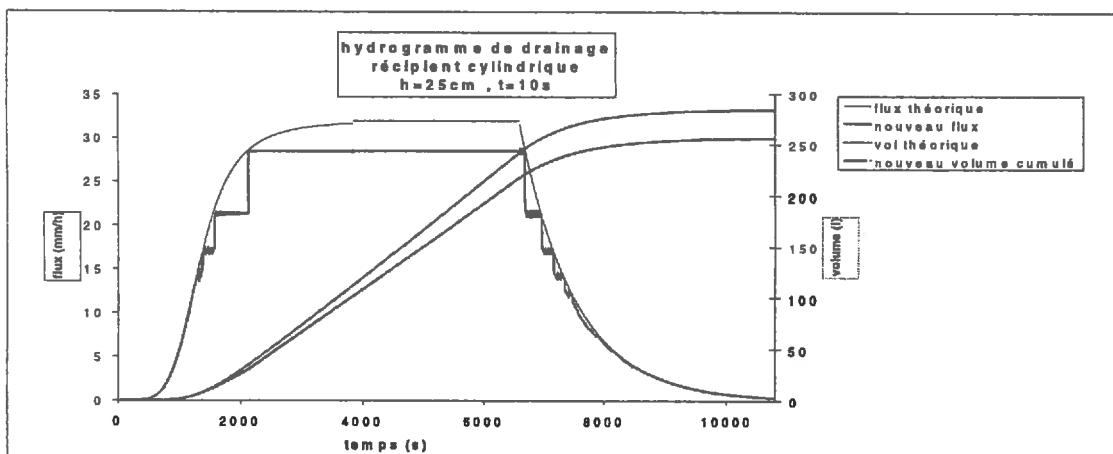


Fig. 13.a. Hydrogramme de drainage: Récipient cylindrique,  $h=25\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$

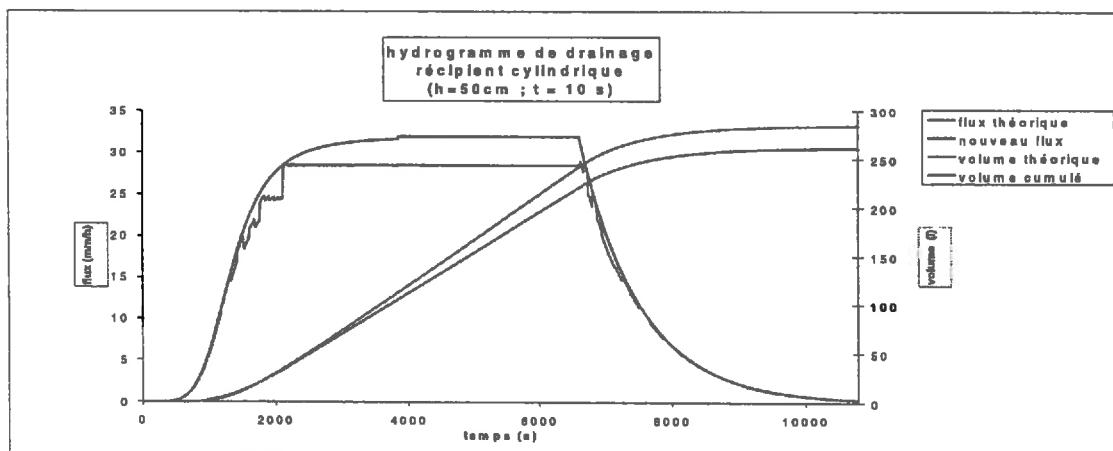


Fig. 13.b. Hydrogramme de drainage: Récipient cylindrique,  $h=50\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$

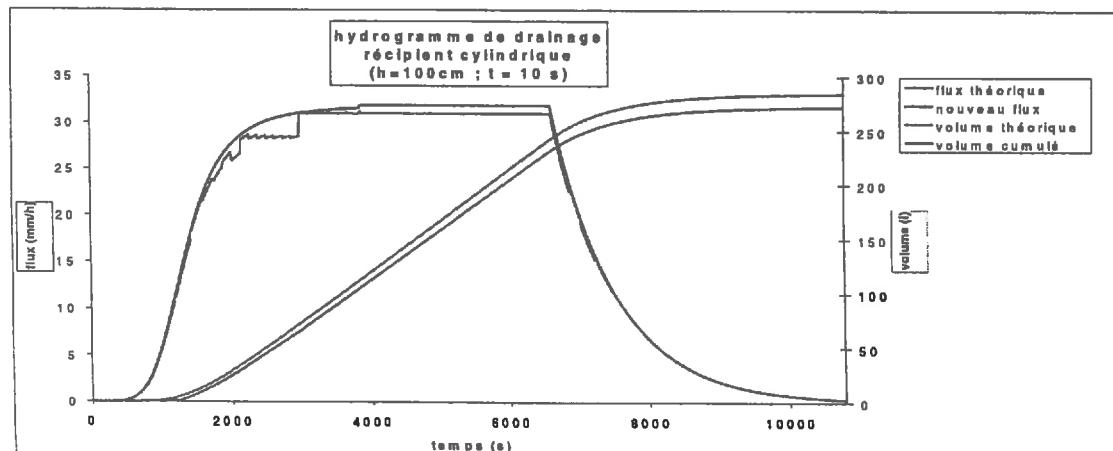


Fig. 13.c. Hydrogramme de drainage: Récipient cylindrique,  $h=100\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$

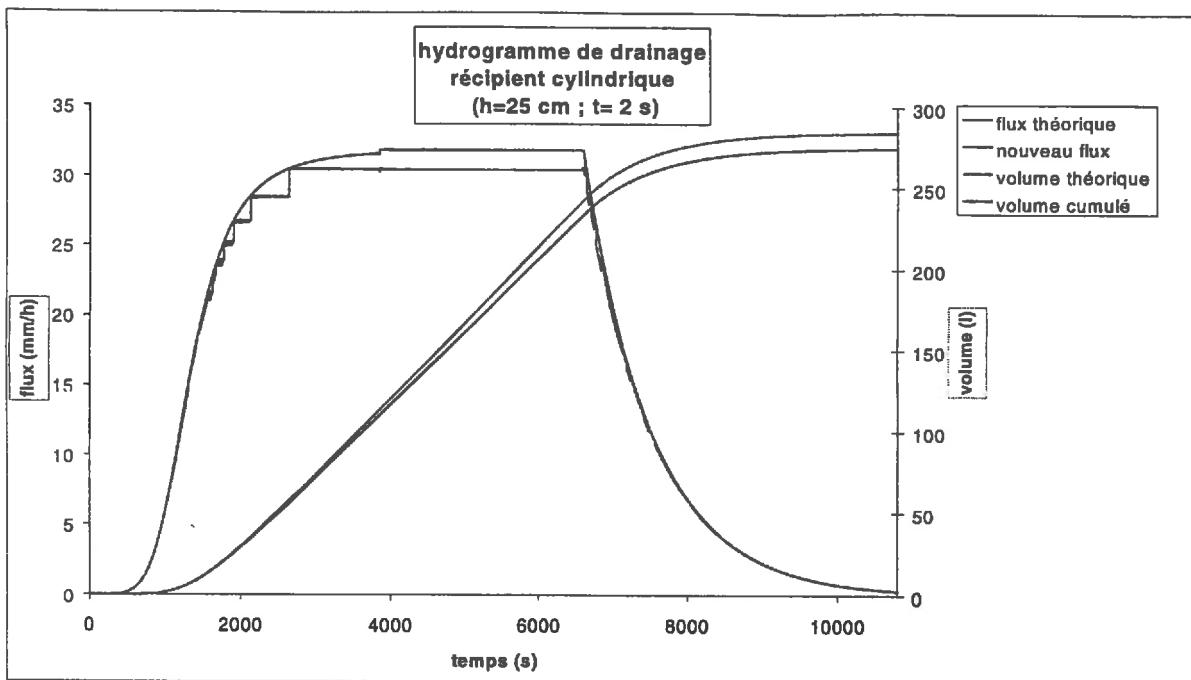


Fig. 14.a. Hydrogramme de drainage: Récipient cylindrique,  $h=25$  cm,  $t=2$  s

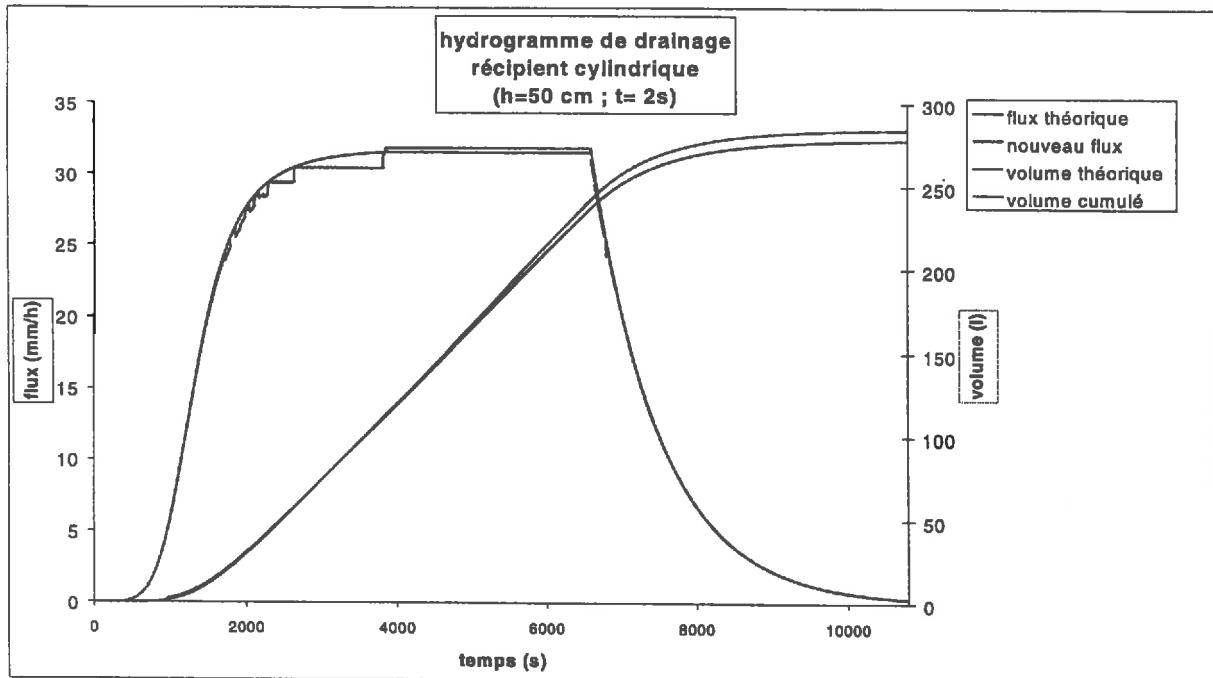


Fig. 14.b. Hydrogramme drainage: Récipient cylindrique,  $h=50$  cm,  $t=2$  s

On remarque que l'hydrogramme modèle est d'autant mieux restitué que la hauteur du détecteur de niveau est grande. Mais dans ce cas, on ne pourra plus fractionner les prélèvements ce qui peut être gênant dans l'analyse et l'interprétation des espèces chimiques.

#### IV.4.3. Influence de la forme du récipient

On compare pour un intervalle de temps de 2s et une hauteur de basculement de 25 cm les formes cylindriques et coniques.

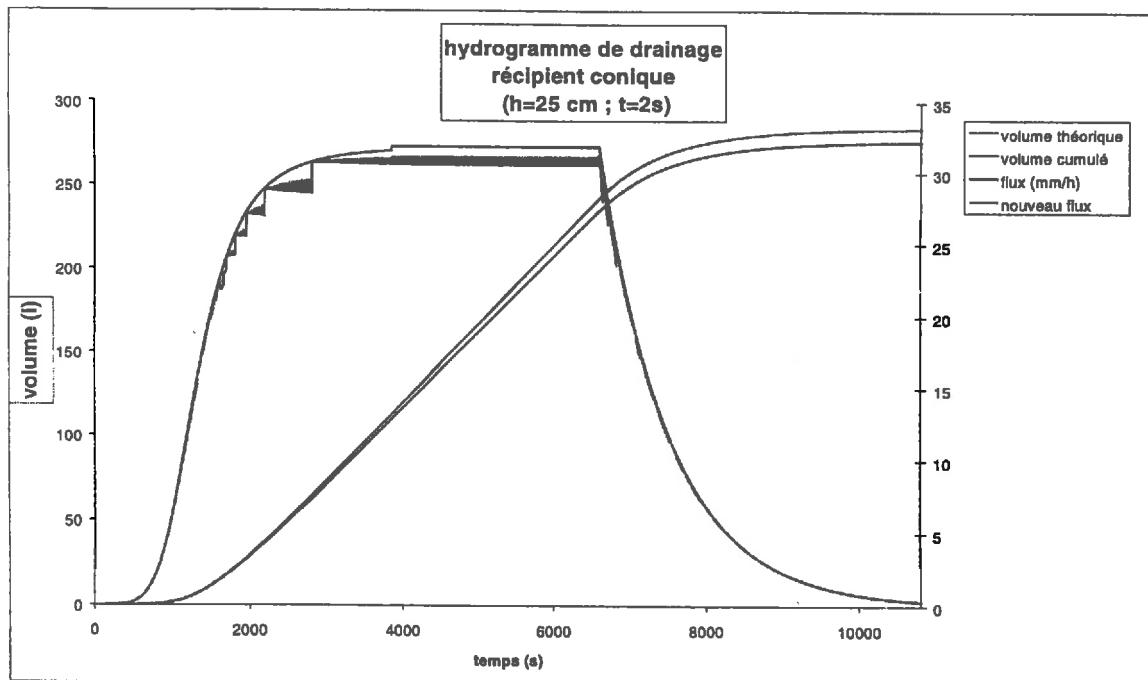


Fig. 15.a. Hydrogramme de drainage: Récipient conique,  $h=25\text{cm}$ ,  $t=2\text{s}$

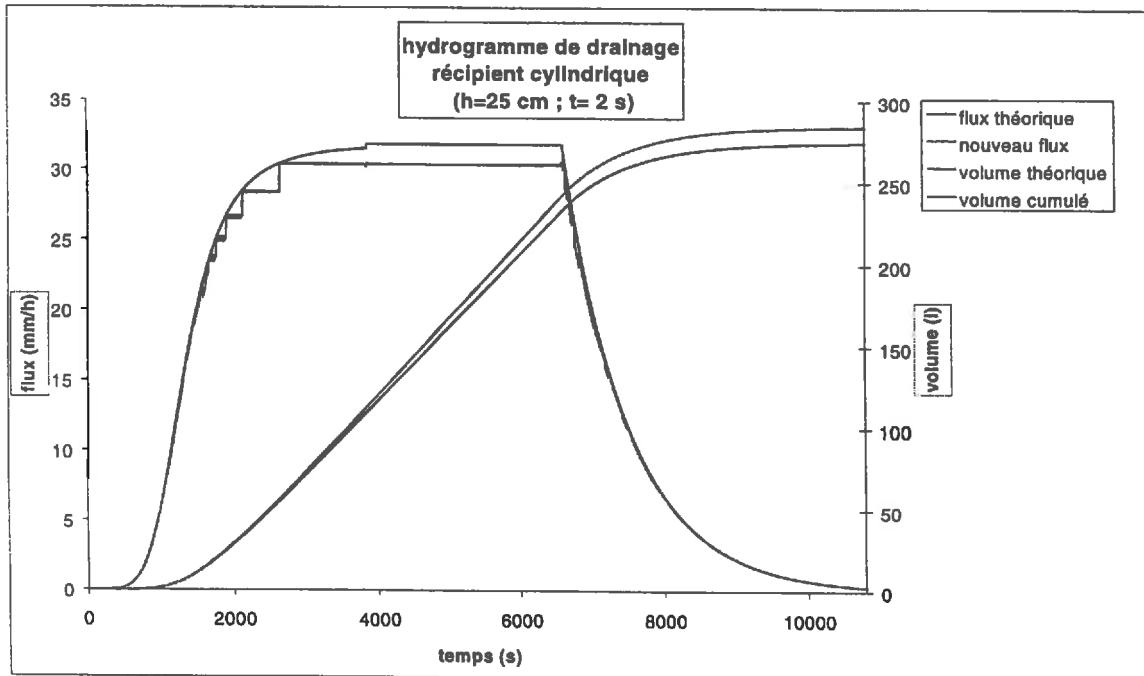


Fig.15.b. Hydrogramme de drainage: récipient cylindrique,  $h=25\text{cm}$ ,  $t=2\text{s}$

On remarque qu'on a une meilleure restitution de l'hydrogramme pour le récipient de forme conique à la fois en volumes cumulés et en flux instantanés. On remarque cependant que le récipient conique introduit des perturbations importantes sur le calcul des flux instantanés. Ceci est dû au réétalonnage en continu et à la forme du récipient. C'est un résultat inattendu de la simulation

#### IV.4.4. Conclusion partielle

Grâce à cette simulation nous pouvons orienter nos choix vers:

- Un temps de retour de table de l'ordre de 2s plutôt que de 10s, car on obtient une bien meilleur restitution de l'hydrogramme théorique
- Des niveaux placés à 25cm, 50 cm et 100cm pour couvrir des événements pluvieux variés et pouvoir échantillonner les volumes d'eau drainés en vue d'une analyse ultérieure,
- Un récipient cylindrique pour des raisons de simplicité et, en plus le récipient conique introduit des perturbations gênantes.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

L'objectif de ce projet a été la réalisation d'un dispositif de mesure et de prélèvement de volumes d'eau drainés à travers une couche de sol, en vue d'obtenir un hydrogramme de drainage et une courbe d'élution.

Cependant, nous avons rencontré un certain nombre de problèmes qui nous ont amené, en amont d'une réalisation technique, à faire une simulation s'appuyant sur un hydrogramme maximal.

Cette simulation nous a permis dans un premier temps de définir nos choix matériels dans le cas où on irait jusqu'au bout de notre stratégie en optimisant le programme d'acquisition de données avec un temps d'échantillonnage de l'ordre de 2s. Eventuellement, dans un second temps nous pouvons nous orienter vers d'autres stratégies permettant de mesurer les volumes d'eau drainés.

Parmi celles-ci on peut citer par exemple l'utilisation d'autres capteurs (les capteurs lasers ou à ultra son qui ne dérivent pas)

## Références

Anonyme, 1999. Bienvenue à l'INRA - 1999. INRA Ed., 80 p.

Aboukhaled, A., J.F. Alfaro et M. Smith, 1986. Les lysimètres. Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage, n° 39, Rome, 79 p.

Hillel, D., 1974. L'eau et le sol : principes et processus physiques. Vander Ed., Louvain, 288 p.

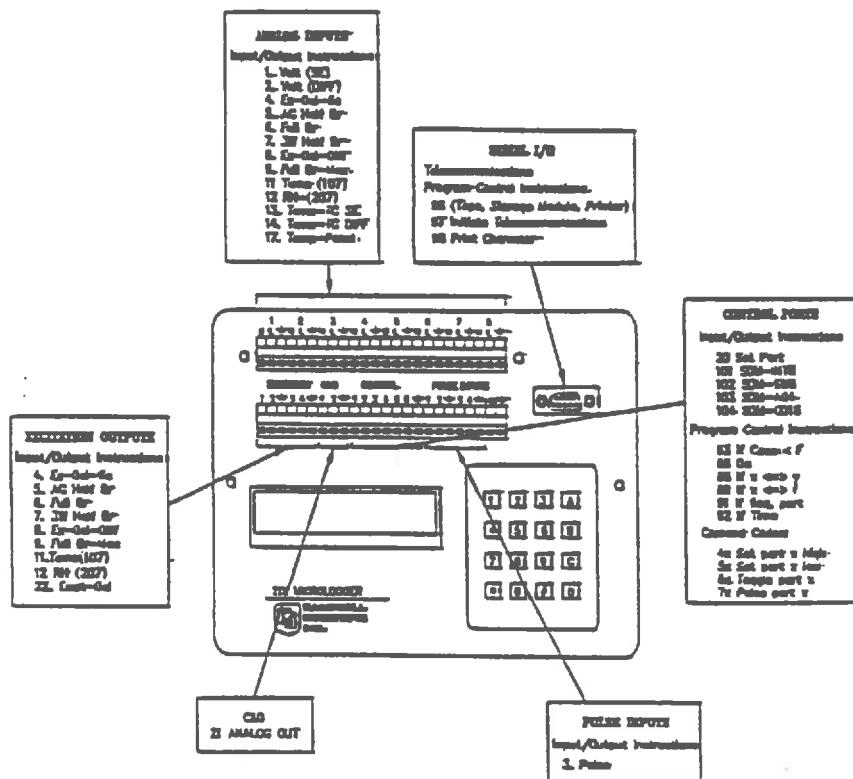
Muller, J.C. (coordinateur), 1996. Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990. INRA Ed., Paris, 390 p.

Sedghi, H., 1971. Etude de l'écoulement de cases lysimétriques. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Paris, 136p.

annexe 1: matériel d'acquisition de données

**CARACTERISTIQUES GENERALES**

**1- LE PANNEAU DE LA CENTRALE :**



**2- MEMOIRE DE LA CENTRALE :**

Mémoire de type RAM (Random Access Memory) divisée en 5 zones :

Centrale	Mémoire Programme	Mémoire Système	Stockage mesure (Input Storage)	Stockage intermédiaire (Intermediate Storage)	Stockage final (Final Storage)
21X	978 <sup>(1)</sup>	1022	112 28 <sup>(2)</sup>	256 64	38592 19296
CR10	1986	3302	112 28	256 64	59816 29908
CR10X	2048	4096	112 28	256 64	124560 62280
CR7	1744	1072	128 32	256 64	37760 18880

(1) exprimé en bytes

(2) exprimé en nombre de locations

4 bytes par location pour Stockage mesure et stockage intermédiaire

2 bytes par location pour Stockage final en haute résolution

**DEFINITION DES TOUCHES DU CLAVIER**

Touche	Exécution
0-9	Entrer des données numériques
*	Entrer du mode
A	Avancer dans la table du programme ou dans le stockage des données Entrer du numéro recherché de la location de la mémoire de stockage final
B	Reculer dans la table du programme ou dans le stockage des données
C	Changer le signe d'un nombre
D	Entrer la virgule d'un nombre
#	Effacer le dernier chiffre à droite du nombre
#D	Eliminer toute une instruction dans la table du programme
#A	Avancer à la prochaine instruction dans la table du programme ou à la ligne suivante dans le stockage final des données.
#B	Reculer à l'instruction précédente dans la table du programme ou à la ligne précédente dans le stockage final des données.

annexe 1 : matériel d'acquisition de données

**DEFINITION DES MODES DU CLAVIER**

Touche	Exécution
*0	Exécution programme(s) si Temps de retour de table > 0 sec Suspension programme(s) si Temps de retour de table = 0 sec
*1, *2	Programmation de la table 1 ou 2 des programmes
*3	Programmation de la table des sous-programmes
*4	Mise en service/Hors service de la sortie des données sur bande ou sur imprimante
*5	Affichage/Réglage du temps réel de l'horloge de la centrale
*6	Affichage/Changement des données du stockage initial (Input storage) Basculement des drapeaux
*7	Affichage des données du stockage final (Final storage)
*8	Eliminer toute une instruction dans la table du programme
*9	Avancer à la prochaine instruction dans la table du programme ou à la ligne suivante dans le stockage final des données.
*A	Affichage/Changement du nombre d'allocations des zones de stockage (initial, intermédiaire et final)
*B	Reculer à l'instruction précédente dans la table du programme ou à la ligne précédente dans le stockage final des données.

## OEM Pressure Sensor Gage and Absolute Stainless Steel Diaphragm Interchangeable

### Features

- Iso-Pressure Structure
- Solid State Reliability
- $\pm 0.5\%$  Accuracy
- Temperature Compensated
- $\pm 1\%$  Normalized Output Span
- Flush Diaphragm
- Ratiometric
- Low Noise
- Infinite Resolution
- Low Cost Resolution
- Serialized

### Typical Applications

- Medical
- Air Conditioning
- Process Control
- Oceanography
- Liquid Level
- Environmental Control
- Water Management
- Refrigeration
- Food Processing
- Agricultural Sprayers
- Pollution Control



### Description

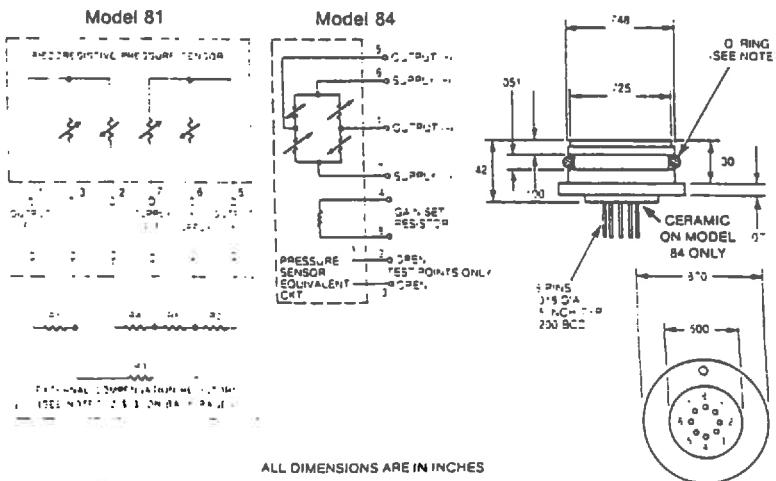
The Models 81 and 84 are solid-state pressure sensors that utilize a 316 stainless steel housing to provide compatibility with most harsh media. Both models are designed to be mounted by using an O-ring to maintain pressure integrity.

For the Model 81, temperature compensation and calibration over 0-50°C is accomplished with the addition of only three external resistors, the values of which are included with each sensor.

For the Model 84, integral temperature compensation is provided along with calibration over 0-50°C with laser trimmed resistors. No external resistors are required. An additional resistor is included to normalize pressure sensitivity variations by programming the gain of an external amplifier, thus providing  $\pm 1\%$  interchangeability along with high level output.

One performance grade is available in gage, sealed gage and absolute pressure from 0-5 psi to 0-300 psi. Each sensor is individually serialized.

### Connections/Dimensions



## Caractéristiques des détecteurs de niveau:

- Capteurs de niveau horizontaux à technologie reed.
- Corps en nylon 11 ou polypropylène.
- Le montage se fait par écrou et contre-écrou par l'intérieur du récipient.
- La fermeture du contact s'effectue lorsque le flotteur est aligné avec le corps du capteur .
- Le sens du montage permet de choisir une utilisation "normalement ouvert" (flotteur en bas) ou "normalement fermé" (flotteur en haut).
- Sortie par câble PVC de 50cm.

## Spécifications techniques:

### *Température d'utilisation:*

- nylon: -20°C à +75°C
- polypropylène -20°C à +100°C

### *Tension max.:*

- nylon: 250 V c.a. et c.c.
- polypropylène: 500 V c.a. et 1000 c.c.

### *Courant max.: 1 A*

### *Puissance max.: 15 W*

### *Angle de déclenchement: 5°*

### *Angle max.: 45°*

### *Epaisseur max. de la paroi: 4 mm*

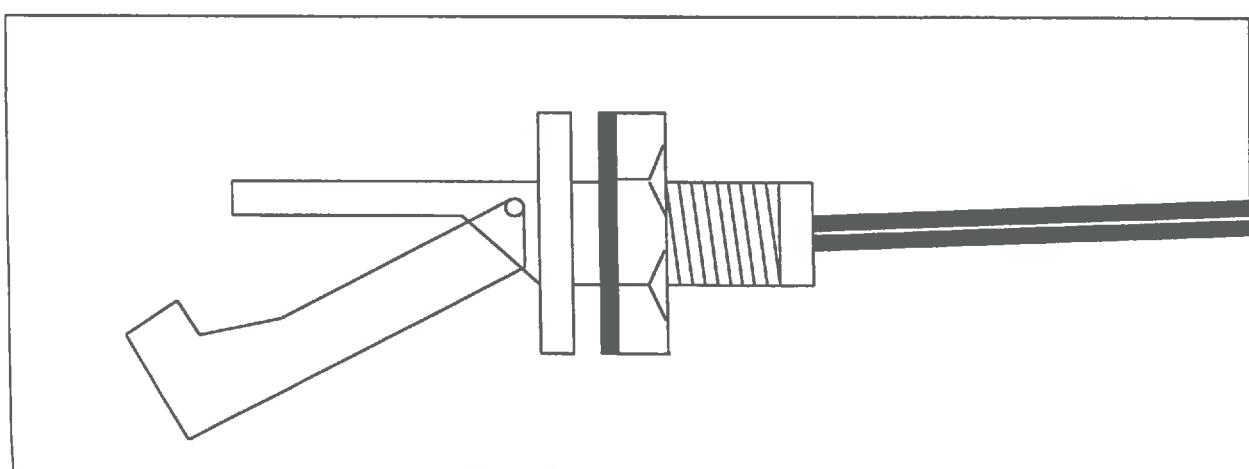


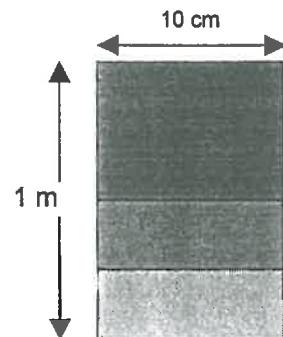
Schéma d'un détecteur de niveau

## cylindre

Volume=pi()\*rayon\*rayon\*hauteur

rayon(cm) = 5

Hauteur(cm)	25	22	28
Volume(cm <sup>3</sup> )	1963	1728	2199
écart(%)	0%	12%	12%
temps(sec)	24	21	26
temps(min)	0.39	0.35	0.44



Hauteur(cm)	50	47	53
Volume(cm <sup>3</sup> )	3927	3691	4163
écart(%)	0%	6%	6%
temps(sec)	47	44	50
temps(min)	0.79	0.74	0.83

Hauteur(cm)	100	97	103
Volume(cm <sup>3</sup> )	7854	7618	8090
écart(%)	0%	3%	3%
temps(sec)	94	91	97
temps(min)	1.57	1.52	1.62

## Cylindre:

Var. aléa.		h=25cm	Volume(cm <sup>3</sup> )	h=50cm	Volume(cm <sup>3</sup> )	h=100cm	Volume(cm <sup>3</sup> )
		Volume(cm <sup>3</sup> )		Volume(cm <sup>3</sup> )		Volume(cm <sup>3</sup> )	
0.35	0.14	1964.60	0.12	3927.91	0.30	7856.37	
0.91	0.60	1968.19	0.19	3928.49	0.30	7856.33	
0.59	0.50	1967.46	0.71	3932.58	-0.38	7850.97	
1.00	-0.10	1962.73	0.20	3928.59	-0.18	7852.59	
0.07	-0.08	1962.83	-0.27	3924.88	-0.49	7850.14	
0.31	-0.08	1962.87	-0.04	3926.64	-0.21	7852.29	
0.73	-0.56	1959.10	-0.30	3924.62	-0.12	7853.03	
0.62	-0.09	1962.77	-0.27	3924.89	-0.14	7852.87	
0.15	-0.15	1962.33	0.06	3927.46	-0.05	7853.62	
0.01	-0.01	1963.43	-1.04	3918.85	-0.48	7850.18	
0.67	0.05	1963.87	0.24	3928.91	0.02	7854.17	
0.56	0.83	1970.02	0.10	3927.76	0.50	7857.90	
0.54	0.64	1968.52	-0.55	3922.68	0.43	7857.37	
0.18	0.28	1965.71	-0.32	3924.47	-0.34	7851.31	
0.22	0.31	1965.92	0.04	3927.32	0.01	7854.06	
0.03	-0.05	1963.07	-0.30	3924.64	0.45	7857.50	
0.87	-0.21	1961.82	0.00	3927.00	-0.01	7853.91	
0.90	0.36	1966.31	-0.43	3923.59	-0.22	7852.22	
0.81	0.04	1963.83	-0.71	3921.41	0.26	7855.99	
0.57	-0.22	1961.75	0.48	3930.75	0.11	7854.82	
0.80	-0.21	1961.88	-0.31	3924.59	-0.04	7853.63	
0.61	-0.61	1958.73	-0.85	3920.29	-0.24	7852.08	
0.49	0.15	1964.71	0.12	3927.95	0.64	7858.98	
0.40	0.43	1966.85	-0.24	3925.08	-0.67	7848.70	
0.11	0.19	1965.01	0.31	3929.41	0.09	7854.72	
0.17	0.23	1965.31	0.80	3933.31	-0.63	7849.06	
0.36	-0.19	1962.01	-0.35	3924.25	-0.80	7847.71	

Cylindre:

Var. aléa.		h=25cm		h=50cm		h=100cm
		Volume(cm <sup>3</sup> )		Volume(cm <sup>3</sup> )		Volume(cm <sup>3</sup> )
0.90	-0.04	1963.19	0.00	3926.96	0.09	7854.71
0.32	0.31	1965.96	0.38	3929.94	0.61	7858.78
0.64	-0.27	1961.40	0.18	3928.39	-0.43	7850.60
0.38	0.28	1965.67	-0.17	3925.66	0.15	7855.19
0.83	-0.72	1957.87	0.26	3929.00	-0.04	7853.63
0.50	-0.93	1956.19	0.13	3928.01	0.17	7855.32
0.41	0.22	1965.24	-0.17	3925.63	0.40	7857.10
0.07	-0.19	1961.98	-0.21	3925.34	-0.05	7853.56
0.85	-0.69	1958.08	-0.12	3926.05	0.22	7855.72
0.99	-0.32	1960.98	0.65	3932.11	0.35	7856.77
0.92	0.10	1964.26	0.60	3931.70	0.05	7854.39
0.98	0.37	1966.38	0.32	3929.53	0.21	7855.66
0.16	-0.46	1959.88	-0.06	3926.55	-0.48	7850.21
0.37	-0.24	1961.58	0.04	3927.30	-0.32	7851.45
0.08	0.39	1966.56	-0.31	3924.54	-0.02	7853.79
0.94	0.16	1964.78	-0.12	3926.02	-0.01	7853.89
0.25	-0.03	1963.27	-0.55	3922.67	0.24	7855.89
0.19	-0.19	1961.99	0.32	3929.47	0.34	7856.68
0.16	0.13	1964.53	0.32	3929.54	-0.01	7853.89
0.36	-0.02	1963.32	0.43	3930.38	0.28	7856.14
0.65	-0.26	1961.47	-0.31	3924.59	-0.44	7850.55
0.89	-0.21	1961.88	0.31	3929.41	0.26	7856.03
0.69	-0.46	1959.86	-0.31	3924.59	0.11	7854.82
0.81	0.39	1966.57	-0.20	3925.40	-0.27	7851.89
0.22	-0.28	1961.26	0.24	3928.88	-0.17	7852.65
0.35	0.21	1965.14	-0.33	3924.40	0.53	7858.17
0.93	0.66	1968.65	0.07	3927.51	-0.20	7852.38
0.01	-0.21	1961.88	0.23	3928.83	0.02	7854.10
0.56	-0.75	1957.60	0.15	3928.19	-0.74	7848.13
0.84	-0.19	1962.01	-0.67	3921.73	-0.32	7851.44
0.99	0.42	1966.79	0.48	3930.78	-0.15	7852.83
0.69	0.35	1966.24	-0.13	3926.01	-0.30	7851.61
0.34	0.26	1965.52	-0.15	3925.81	0.11	7854.86
0.74	-0.49	1959.66	0.32	3929.50	-0.02	7853.84
0.57	-0.13	1962.45	0.43	3930.39	0.21	7855.66
0.25	0.20	1965.06	0.21	3928.67	-0.19	7852.50
0.73	0.19	1964.95	0.38	3929.97	0.41	7857.21
0.77	-0.56	1959.14	-0.01	3926.95	0.27	7856.09
0.16	0.04	1963.80	0.04	3927.28	0.46	7857.56
0.58	-0.24	1961.59	-1.19	3917.66	-0.63	7849.06
0.72	0.05	1963.89	0.57	3931.47	0.34	7856.69
0.83	-0.27	1961.41	-0.01	3926.88	-0.17	7852.67
0.75	0.08	1964.11	0.05	3927.34	0.68	7859.31
0.56	-0.04	1963.19	0.03	3927.20	0.38	7856.93
0.43	-0.16	1962.27	-0.74	3921.15	0.39	7857.02
0.29	-0.01	1963.41	-0.14	3925.86	-0.06	7853.55
0.12	-0.35	1960.78	-0.19	3925.50	0.27	7856.13
0.09	0.58	1968.02	-0.17	3925.63	-0.48	7850.23
0.62	0.58	1968.04	0.43	3930.33	-0.49	7850.15
0.33	-0.31	1961.05	0.13	3928.01	-0.01	7853.93

**Cylindre:**

Var. aléa.		h=25cm	Volume(cm3)	h=50cm	Volume(cm3)	h=100cm	Volume(cm3)
0.07	-0.54	1959.23	0.63	3931.98	-1.11	7845.29	
0.51	-0.22	1961.74	0.01	3927.03	-0.09	7853.30	
0.04	0.21	1965.18	-0.08	3926.33	-0.34	7851.32	
0.63	-0.03	1963.29	-0.67	3921.76	0.21	7855.60	
0.04	-0.46	1959.91	0.34	3929.67	-0.05	7853.56	
0.07	-0.23	1961.65	-0.55	3922.67	-0.11	7853.14	
0.86	-0.56	1959.10	0.46	3930.57	-0.52	7849.92	
0.71	-0.15	1962.33	0.55	3931.29	0.42	7857.28	
0.57	0.29	1965.76	0.09	3927.67	-0.45	7850.47	
0.86	0.85	1970.20	-0.97	3919.36	-0.61	7849.20	
0.56	0.35	1966.26	0.26	3929.07	0.29	7856.23	
0.31	-0.25	1961.57	0.02	3927.15	-0.44	7850.56	
0.75	0.22	1965.23	-0.36	3924.15	0.42	7857.30	
0.08	0.32	1965.98	0.25	3928.95	0.24	7855.86	
0.98	-0.19	1962.03	0.85	3933.66	-0.70	7848.48	
0.12	-0.04	1963.22	-0.13	3925.96	-0.41	7850.76	
0.30	0.30	1965.86	-0.41	3923.77	0.21	7855.65	
0.41	0.87	1970.34	-0.08	3926.34	0.44	7857.48	
0.14	-0.27	1961.36	-0.08	3926.35	-0.69	7848.57	
0.50	0.36	1966.32	-0.26	3924.94	-0.37	7851.07	
0.78	-0.64	1958.51	0.21	3928.63	0.35	7856.70	
0.72	0.03	1963.76	-0.36	3924.16	-0.04	7853.66	
0.42	0.19	1964.95	0.40	3930.15	0.57	7858.44	
0.55	-0.31	1961.09	-0.31	3924.54	-0.13	7852.93	
moyenne		1963.44		3926.88		7853.73	
écart type		2.90		3.14		2.94	

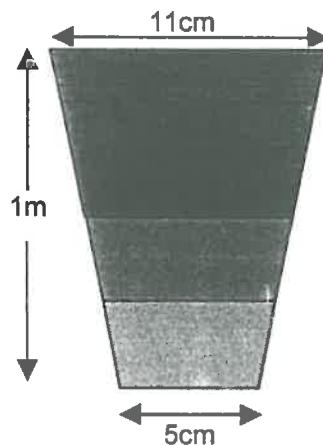
cône

$$\text{Volume} = \frac{1}{3} \pi (\text{rhaut}^2 \text{rhaut} + \text{rhaut} \text{rbas} + \text{rbas}^2 \text{rbas}) \text{hauteur}$$

$$\text{rhaut(cm)} = 5.5$$

$$\text{rbas(cm)} = 2.5$$

Hauteur (cm)	R(cm)
0	2.5
22	3.2
25	3.3
28	3.3
47	3.9
50	4.0
53	4.1
97	5.4
100	5.5
103	5.6



Hauteur(cm)	25	22	28
Volume(cm <sup>3</sup> )	653	556	755
écart(%)	0.00%	14.83%	15.67%
temps(sec)	8	7	9
temps(min)	0.1	0.1	0.2

Hauteur(cm)	50	47	53
Volume(cm <sup>3</sup> )	1689	1541	1843
écart(%)	0.00%	8.73%	9.13%
temps(sec)	20	18	22
temps(min)	0.3	0.3	0.4

Hauteur(cm)	100	97	103
Volume(cm <sup>3</sup> )	5262	4982	5552
écart(%)	0.00%	5.33%	5.51%
temps(sec)	63	60	67
temps(min)	1.1	1.0	1.1

var. aléa		h=25cm		h=50cm		h=100cm	
		volume(cm <sup>3</sup> )		volume(cm <sup>3</sup> )		volume(cm <sup>3</sup> )	
0.01	-0.10	652.59	0.44	1690.09	0.55	5265.08	
0.30	-0.36	651.93	-0.35	1687.44	0.26	5263.52	
0.06	0.34	653.74	0.24	1689.43	-0.15	5261.36	
0.88	-0.29	652.11	-0.66	1686.36	0.34	5263.96	
0.87	-0.19	652.37	-0.62	1686.52	-0.02	5262.08	
0.54	0.08	653.08	0.01	1688.63	0.30	5263.73	
0.52	1.20	655.98	-0.17	1688.03	0.20	5263.24	
0.51	-0.53	651.49	-0.39	1687.27	0.24	5263.41	
0.38	0.54	654.27	0.25	1689.45	-0.47	5259.70	
0.97	-0.23	652.25	-0.48	1686.99	0.06	5262.49	
0.32	0.57	654.35	-0.17	1688.03	0.41	5264.35	
0.88	-0.14	652.50	-0.62	1686.50	0.11	5262.77	

var. aléa		h=25cm		h=50cm		h=100cm
		volume(cm3)		volume(cm3)		volume(cm3)
0.88	0.57	654.34	-0.03	1688.52	-0.07	5261.81
0.98	0.55	654.29	-0.37	1687.37	0.08	5262.59
0.91	0.43	653.97	0.26	1689.49	-0.42	5259.94
0.04	-0.16	652.45	-0.46	1687.06	0.47	5264.62
0.75	0.81	654.98	-0.77	1686.00	-0.13	5261.50
0.89	-0.02	652.81	-0.60	1686.59	-0.68	5258.61
0.35	-0.11	652.58	0.02	1688.69	0.08	5262.58
0.21	0.76	654.85	0.03	1688.71	0.40	5264.25
0.95	0.34	653.75	0.39	1689.91	-0.07	5261.82
0.35	0.24	653.49	-0.44	1687.13	0.34	5263.94
0.66	0.11	653.14	-0.32	1687.54	-0.30	5260.60
0.09	0.02	652.91	0.27	1689.53	0.34	5263.96
0.81	0.40	653.91	0.18	1689.22	-0.04	5261.96
0.72	-0.32	652.01	-0.41	1687.23	-0.26	5260.81
0.10	-0.12	652.55	-0.12	1688.20	-0.40	5260.08
0.71	-0.03	652.77	0.28	1689.54	0.03	5262.33
0.14	-0.40	651.83	-0.13	1688.16	0.80	5266.37
0.68	-0.25	652.21	-0.05	1688.43	-0.39	5260.10
0.92	-0.40	651.83	0.20	1689.27	-0.53	5259.36
1.00	-0.47	651.63	0.64	1690.76	-0.05	5261.92
0.90	0.07	653.05	0.38	1689.89	-0.42	5259.96
0.42	-0.97	650.33	0.05	1688.77	0.28	5263.66
0.49	1.38	656.46	0.59	1690.61	0.16	5263.00
0.47	0.12	653.17	0.32	1689.67	0.06	5262.50
0.27	-0.14	652.49	-0.13	1688.15	0.64	5265.54
0.64	-0.45	651.68	-0.61	1686.53	0.00	5262.19
0.28	0.03	652.94	-0.73	1686.12	1.07	5267.79
0.23	0.41	653.92	-0.35	1687.41	0.04	5262.36
0.80	0.02	652.91	-0.20	1687.93	-0.64	5258.78
1.00	-0.09	652.63	-0.09	1688.30	0.36	5264.04
0.16	-0.26	652.18	-0.58	1686.66	0.04	5262.37
0.56	-0.05	652.72	0.24	1689.40	-0.16	5261.33
0.60	-0.48	651.62	-0.38	1687.32	-0.04	5261.94
0.68	-0.47	651.63	-0.18	1688.00	-0.41	5260.01
0.02	0.34	653.75	-0.33	1687.49	-0.07	5261.79
0.53	-0.47	651.63	-0.29	1687.64	0.00	5262.19
0.39	-0.72	650.97	-0.19	1687.95	0.04	5262.37
0.55	0.70	654.68	-0.41	1687.22	-0.17	5261.27
0.74	0.78	654.89	-0.42	1687.20	-0.08	5261.75
0.51	0.01	652.89	-0.73	1686.13	-0.06	5261.86
0.43	-0.24	652.23	-0.22	1687.87	0.14	5262.92
0.77	0.36	653.80	-0.10	1688.27	-0.12	5261.56
0.63	0.84	655.04	0.17	1689.19	0.06	5262.49
0.58	0.28	653.59	-0.70	1686.24	0.75	5266.11
0.28	-0.12	652.54	0.68	1690.92	-0.06	5261.84
0.01	-0.36	651.91	-0.09	1688.29	-0.85	5257.71
0.22	0.09	653.10	0.15	1689.13	0.62	5265.42
0.79	0.47	654.09	0.54	1690.41	0.32	5263.87
0.07	0.43	653.99	-0.09	1688.32	0.27	5263.58
0.58	0.28	653.60	-0.03	1688.51	-0.30	5260.57

var. aléa		h=25cm	volume(cm <sup>3</sup> )	h=50cm	volume(cm <sup>3</sup> )	h=100cm
		volume(cm <sup>3</sup> )		volume(cm <sup>3</sup> )		volume(cm <sup>3</sup> )
0.57	0.27	653.57	0.09	1688.92	0.14	5262.93
0.38	0.48	654.12	1.00	1691.99	-0.34	5260.37
0.77	0.34	653.74	0.65	1690.80	0.17	5263.05
0.19	0.08	653.06	0.55	1690.46	0.27	5263.60
0.21	-0.12	652.56	-0.31	1687.57	-0.04	5261.94
0.60	0.46	654.07	-0.10	1688.28	-0.27	5260.74
0.25	-0.59	651.32	0.76	1691.19	0.01	5262.23
0.99	0.58	654.38	0.42	1690.02	-0.67	5258.62
0.03	0.84	655.06	-0.75	1686.06	0.50	5264.82
0.41	0.55	654.29	-0.10	1688.27	0.37	5264.11
0.47	-0.53	651.47	0.44	1690.11	0.48	5264.68
0.30	-0.32	652.01	0.50	1690.29	0.24	5263.44
0.85	0.32	653.69	-0.22	1687.86	-0.63	5258.87
0.21	0.18	653.33	0.78	1691.23	-0.27	5260.73
0.75	0.24	653.48	-0.05	1688.45	-0.14	5261.43
0.46	0.53	654.24	0.23	1689.38	0.26	5263.55
0.35	-0.19	652.37	0.02	1688.66	-0.09	5261.71
0.90	0.82	654.99	-0.21	1687.91	0.04	5262.40
0.98	-0.04	652.75	0.67	1690.86	-0.09	5261.69
0.02	0.10	653.13	0.34	1689.76	0.04	5262.38
0.65	0.23	653.47	-1.08	1684.97	-0.22	5261.01
0.55	-0.24	652.24	0.24	1689.42	0.14	5262.91
0.17	0.70	654.70	-0.39	1687.31	-0.09	5261.69
0.61	-0.10	652.59	-0.30	1687.59	0.82	5266.47
0.56	0.57	654.36	-0.62	1686.52	-0.28	5260.69
0.12	-0.33	652.01	0.03	1688.70	0.34	5263.95
0.88	0.39	653.88	0.77	1691.19	-0.34	5260.40
0.81	0.50	654.16	0.88	1691.59	0.24	5263.42
0.79	0.21	653.41	-0.23	1687.83	0.05	5262.42
0.45	-0.48	651.62	0.35	1689.80	-0.08	5261.73
0.21	-0.29	652.11	0.33	1689.72	-0.02	5262.05
0.43	0.26	653.53	0.31	1689.66	0.51	5264.83
0.82	-0.29	652.09	0.12	1689.00	0.19	5263.17
0.50	-0.09	652.62	0.03	1688.70	-0.65	5258.77
0.32	-0.13	652.51	-0.69	1686.26	0.61	5265.39
0.05	-0.18	652.38	0.01	1688.65	0.03	5262.32
0.23	-0.20	652.35	-0.09	1688.31	-1.10	5256.37
0.17	0.47	654.09	-0.30	1687.58	-0.43	5259.89
0.13	1.07	655.65	0.19	1689.26	-0.38	5260.19

moyenne
écart type

653.14
1.15

1688.49
1.45

5262.26
1.98