

O.R.S.T.O.M.

HYDROLOGIE

Essai de simulation analytique du ruissellement

sur une petite surface homogène

D. IBIZA

Paris, Mars 1976. 17 MAI 1978

O. R. S. T. O. M.

Collection de Références

B8161 Hydr.

ESSAI DE SIMULATION ANALYTIQUE DU RUISSELLEMENT

SUR UNE PETITE SURFACE HOMOGENE

Le programme présenté ci-dessous est une tentative de simulation du volume ruisselé-instantané provoqué par une averse, à partir du hyétogramme de l'averse et de la pluviométrie enregistrée en un site.

Il a été mis au point essentiellement à partir d'observations faites sur AMBATOMAINTY (Hauts plateaux malgaches).

Son champs d'application est une petite surface homogène mais il peut être étendu dans certaines circonstances à un petit bassin (jusqu'à 50 ha).

1 - Objectif poursuivi

Le programme n'est pas utilitaire et n'a pas pour objectif de générer des données hydrologiques à partir d'un échantillon observé.

Nous souhaitons plutôt fournir un outil capable de définir le comportement hydrique d'un petit ensemble par la détermination de paramètres simples, de permettre de comparer les sites entre eux et de dégager, si possible, l'influence particulière de divers facteurs auxquels est lié le ruissellement tels que : pente, couvert végétal, nature du sol etc...

L'objectif final serait de créer par essais successifs une sorte de banque de comportements typiques au ruissellement.

Il va de soi que ce programme n'est dans son stade actuel qu'une ébauche qui devrait être améliorée et affinée au fur et à mesure de l'amélioration de nos connaissances en ce domaine. Il devrait profiter en particulier des essais entrepris sur parcelles avec le simulateur de pluies.

2 - Généralités, définitions de certaines caractéristiques des averses et des sols

L'infiltration dans le cas le plus fréquent, en l'absence de ruissellement, est très voisine de la pluie. La succession chronologique des intensités d'eau infiltrées dans le sol est identique à celle des quantités d'eau mises au contact du sol, quantités dont la répartition peut être sensiblement différente du hyétogramme de l'averse pour peu que la végétation joue un rôle d'interception important.

Lorsqu'il y a production de ruissellement, on peut dire que dans une partie au moins de l'averse, les intensités précipitées ont été supérieures à la capacité d'infiltration du sol et que l'infiltration a alors suivi des lois définies, faisant intervenir des caractéristiques physiques des sols, du couvert végétal, de la pente, etc... Ce sont ces lois de l'infiltration dans les conditions d'intensités saturantes de la pluie que nous avons essayé d'analyser et de traduire par des algorithmes à défaut de leur connaissance précise.

2.1. Caractéristiques de l'averse

Dans les averses qui provoquent du ruissellement, seule une petite partie de l'averse est génératrice de ruissellement et nous sommes amenés dans un stade préliminaire à découper l'averse en différentes parties et cela entraîne un certain nombre de définitions.

Averse Dans notre programme, le critère de séparation de deux averses porte sur le temps séparant deux corps d'averse. Si ce temps est supérieur à la valeur TFIN (valeur donnée en entrée prise égale à 6 heures) les averses sont séparées.

Le critère de séparation correspond en fait à un critère de séparation des crues. Chaque averse peut contenir au maximum 10 corps d'averse.

Corps d'averse (CORP) Ce sont, à l'intérieur de l'averse, toutes les parties susceptibles de ruisseler et, constituées de fractions élémentaires de pluies adjacentes dont les intensités dépassent un certain seuil défini à priori (not. SEUIL).

Temps du corps d'averse (TEMP) Somme des intervalles de temps correspondant.

Corps total de l'averse (CORT) C'est la somme des différents corps d'averse.

Cette valeur est parfois appelée "pluie utile".

Temps total du corps d'averse (TEMPT) C'est la somme des temps de corps d'averse d'une même averse.

Pluie antérieure (IPANT) Pluie tombée sur le site depuis le début de la saison des pluies jusqu'au jour antérieur à l'averse considérée.

Pluie initiale (PINIT) Pluie précipitée pendant un temps TDEP juste avant le premier corps partiel d'averse. TDEP est une valeur donnée en entrée et est prise égale à 6 heures.

2.2. Définitions des états caractéristiques de la première couche superficielle du sol

La logique du programme repose sur le bilan de la première couche du sol dont l'état humide conditionne en grande partie le ruissellement. Ce découpage du sol est un peu arbitraire et on peut, pour fixer les idées, évaluer à 10 cm l'épaisseur de cette couche superficielle. Le bilan de cette couche contient éventuellement les capacités d'interception du couvert végétal.

Les différents états sont :

Etat sec C'est l'état d'humidité en début de la saison des pluies. Cet état est généralement voisin du point de flétrissement. En effet, l'humidité de cette première couche du sol varie très rapidement, et il suffit d'une très petite sécheresse pour aboutir au point de flétrissement.

On peut donc définir, à peu de choses près, cet état comme l'état d'humidité minimum au dessous duquel les plantes ne peuvent plus extraire de l'eau dans cette tranche.

Etat de rétention Cet état est caractérisé par le fait

- qu'en l'absence de pluie il ne peut évoluer que par ponction des plantes et restitution à l'atmosphère sous la forme d'ETR.
- que toute quantité d'eau supplémentaire apportée percole au bout d'un certain temps dans les tranches profondes du sol.

Etat de saturation La tranche superficielle du sol peut absorber provisoirement, durant une averse, une quantité d'eau supplémentaire par rapport à l'état de rétention, qu'elle restitue ensuite sous forme de percolation vers les tranches profondes au bout d'un temps plus ou moins long que nous appellerons temps de ressuyage (TRESO) et qui peut varier de 3 à 6 heures suivant les types de sol. L'état de saturation correspond à la capacité de stockage maximale de la tranche superficielle. Cet état est fugitif puisqu'il évolue, en l'absence de pluie, vers l'état de rétention au bout du temps TRESO.

2.3. Définition des différentes capacités de stockage possibles

- La capacité de stockage total de la première couche superficielle du sol entre les deux états extrêmes (sec et saturation) est appelée STOCK et représente une donnée d'entrée du programme.
- La capacité de stockage permettant de faire évoluer le sol de l'état sec à l'état de rétention est appelée Déficit par rapport à l'état de rétention du sol sec (IDEFI). Elle constitue également une donnée d'entrée.
- La valeur STOCK - IDEFI représente la capacité de stockage de l'état de rétention à l'état de saturation qui comprend les capacités d'interception du couvert végétal.
Cette capacité est disponible à chaque averse alors que la capacité de stockage IDEFI est progressivement comblée par des précipitations antérieures.

3. Algorithmes de l'infiltration instantannée

3.1. Capacité de stockage au début du corps d'averse

Elle est définie par la relation

$$STOC = STOCK - IDEFI + DEF - PINIT$$

3.1.1. Calcul de la variable DEF

DEF représente le déficit par rapport à l'état de rétention du sol le jour antérieur à l'averse. Il est calculé jour par jour dans une subroutine par les équations suivantes :

- a) - Initialisation IDEF étant une variable intermédiaire

$$(1) \quad IDEF = IDEFI$$
 en début de saison des pluies - le 1er octobre pour Ambatomainy
- b) - Equation récurrente
 Au jour j

$$IDEF(j) = IEV - IPLUI + IDEF(j-1)$$
 - IEV étant la fraction de l'ETR journalière de la première tranche du sol. IEV est une donnée d'entrée du programme et vaut généralement 1/3 de ETR.
 - IPLUI est la quantité de pluie tombée en 24 heures.
- c) Limites inférieures et supérieures de IDEF

La variation de DEF est limitée supérieurement et inférieurement par les équations suivantes

$$\begin{cases} DEF = \text{Minimum} (IDEF, IDEFI) \\ DEF = \text{Maximum} (IDEF, 0) \end{cases}$$

Cela signifie que la variable DEF évolue entre les bornes IDEFI (état sec) et zéro (état de rétention). D'un point de vue physique on considère que IEV = 0 lorsque le sol est à l'état sec et que, d'autre part, l'excédent de pluie percole vers les couches profondes du sol lorsque la couche superficielle a atteint l'état de rétention. Le calcul de DEF est arrêté à la veille du jour de l'averse. Ce calcul est un peu simpliste mais nous paraît suffisant pour traduire l'état du sol au début de l'averse.

3.1.2 Calcul de la variable PINIT

Pendant le temps TDEP précédent le premier corps d'averse, on comptabilise les fractions élémentaires de pluie ayant précipité en leur affectant un abattement linéaire (ressuyage) en fonction du temps les séparant du premier corps d'averse de telle façon que ces valeurs deviennent nulles au bout du temps TRESSO.

Si TRESS est le temps séparant la fraction élémentaire JPT de pluie du CORP d'averse, la fraction APT comptabilisée dans la pluie PINIT sera

$$APT = JPT - JPT \cdot \frac{TRESS}{TRESSO}$$

et PINIT = Somme des APT

PINIT ne pouvant être négatif sera ensuite borné inférieurement par zéro.

3.2 Lois de l'infiltration - Hypothèses de base

3.2.1 Schéma directeur de base

Si on imagine une courbe décroissante en fonction du temps telle que celle dessinée sur la figure 1. On pourra imaginer que cette capacité d'absorption décroît jusqu'à une valeur constante appelée seuil minimal d'absorption (SEUIL).

La courbe de décroissance pendant le régime transitoire pourra être une parabole d'axe vertical se raccordant tangentiellement à la droite figurant le seuil.

La surface hachurée comprise entre la courbe et l'axe des temps pourra représenter la quantité d'eau infiltrée pendant le corps d'averse (de temps T). Cette quantité peut se décomposer arbitrairement en une infiltration constante de valeur SEUIL.T et par une quantité d'eau supplémentaire B à fournir au sol pendant la phase transitoire. Si C est le corps d'averse, L la lame ruisselée, la relation mathématique de l'infiltration se met alors sous la forme

$$C - L = AT + B$$

ou B est une valeur variable suivant l'état initial du sol (figure 3)

3.2.2 Définition de la parabolé limite de percolation

Regardons maintenant la figure 2 et revenons à la notion de bilan de la couche superficielle du sol. La décomposition effectuée de la quantité infiltrée est la même que dans la figure 1 puisque la parabole inférieure est translatée de la précédente de la valeur de SEUIL mais cette fois-ci nous allons donner une signification physique à cette décomposition.

En effet lorsqu'on a atteint le régime permanent, c'est-à-dire lorsque l'infiltration est constante, on peut considérer que la tranche superficielle est saturée et que cette infiltration percole vers les tranches profondes.

Pendant la phase transitoire, par contre, une partie de l'eau infiltrée s'emmagasine dans la tranche superficielle et une partie percole. Il est naturel d'admettre que pour les faibles intensités, l'eau infiltrée reste dans la tranche et qu'il n'y a percolation que lorsque l'intensité devient assez forte.

Pour expliquer ce schéma, supposons que le sol au temps T reçoive une fraction L de durée ΔT.

Trois cas peuvent se produire suivant l'importance de cette intensité :

- Faibles intensités (supérieures ou non à la valeur de SEUIL) : stockage de L dans la couche superficielle du sol.
- Intensités plus fortes : stockage jusqu'au niveau de la parabole limite (XPAR), l'excédent percolant vers les couches profondes.
- Intensités très fortes : stockage + percolation + ruissellement.

3.3 Equations de l'infiltration

La parabole inférieure est bien définie par son ordonnée à l'origine X SEC et le volume qu'elle délimite avec les deux axes de coordonnées est égal à STOCK.

Une ordonnée intermédiaire d'abscisse T est définie par le stock restant disponible dans la couche superficielle du sol.

Si STOC est cette valeur, on a :

$$\frac{X \text{ PAR}}{X \text{ SEC}} = \left(\frac{STOC}{STOCK} \right)^{2/3}$$

La valeur de la variable XPAR au temps $T + \frac{\Delta T}{2}$ est calculée de la façon suivante

$$\frac{X \text{ PAR } 1}{X \text{ SEC}} = \left(\frac{STOC}{STOCK} \right)^{2/3}$$

$$STOC \ 2 = STOC - X \text{ PAR } 1 \cdot \Delta T$$

$$\frac{X \text{ PAR } 2}{X \text{ SEC}} = \left(\frac{STOC \ 2}{STOCK} \right)^{2/3}$$

$$X \text{ PAR} = \frac{X \text{ PAR } 1 + X \text{ PAR } 2}{2}$$

La parabole limite de ruissellement est translatée de SEUIL et se définit par

$$XINT = XPAR + SEUIL.$$

3.4 Evolution de processus et détermination du ruissellement

Le processus évolue pas à pas. Au début du corps d'averse STOC est défini par l'équation du paragraphe 3.1.

S'il survient à l'instant T une fraction d'averse JPT de durée ΔT on aura le décompte suivant :

- a) Stockage :
- si l'intensité de cette fraction d'averse est supérieure à XPAR,
 - Stockage = $XPAR \cdot \Delta T$
 - si l'intensité est inférieure à XPAR,
 - Stockage = JPT
- b) Ruissellement : $JPT - XINT \cdot \Delta T$
- c) Nouveau stock restant disponible
- $STOC \text{ (nouveau)} = STOC \text{ (ancien)} - XPAR \cdot \Delta T$ Premier cas de a)
 - $STOC \text{ (nouveau)} = STOC \text{ (ancien)} - JPT$ Deuxième cas de a)

Les nouvelles conditions initiales sont établies pour un nouveau décompte d'une nouvelle fraction de pluie jusqu'à épuisement du corps d'averse.

3.5 Cas de plusieurs corps d'averse

Les corps d'averse suivants sont traités de la même façon que le premier corps à la différence près que la valeur initiale de PINIT est donnée par l'équation

$$PINIT = STOCK - IDEFI + DEF - STOC \text{ (résultant)}$$

4 - Extension spatiale possible

Ce programme est plus spécialement destiné à être utilisé sur une petite surface homogène.

Son champ d'application peut être toutefois étendu moyennant certaines corrections à des petits bassins homogènes.

Dans ce cas, le hyétogramme moyen sur le bassin est le hyétogramme obtenu à un pluviographe corrigé par une affinité de coefficient égal au rapport de la pluie moyenne en 24 heures sur le bassin à la pluie en 24 heures obtenue au pluviographe.

Dans le cas où il y a plusieurs pluviographes sur le bassin, on choisit le hyétogramme provenant du pluviographe dont la pluie recueillie en 24 heures se rapproche le plus de la pluie moyenne en 24 heures sur le bassin.

Dans le programme, le coefficient d'affinité est appelé HOM.

Cas des cyclones : Les cyclones sont composés de séquences pluvieuses de fortes intensités englobées dans une période pluvieuse pouvant durer plusieurs jours.

Le cas des cyclones est particulièrement intéressant, car les sols sont saturés au moment où arrive la séquence des fortes intensités génératrices de crues exceptionnelles. Dans ce cas particulier, la courbe de capacité d'absorption du sol a évolué jusqu'à sa phase permanente et l'équation du ruissellement se réduit à $C - L = AT$ qui est d'une simplicité remarquable.

Ce résultat a été observé sur les bassins d'Ambatomainty et sur d'autres petits bassins en couvert forestier dans la région de PERINET.

5 - Confrontation avec les mesures d'Ambatomainty

Infirmité partielle de la méthode.

La notion de remplissage d'un stock disponible par une quantité d'eau

de pluie déterminée est trop rigoureuse.

En fait, sur Ambatomainy, on constate que le stock à prélever sur la pluie lorsqu'on a déjà atteint l'état de rétention du sol est variable avec la forme de l'averse.

Si on représente l'échantillon suivant le schéma (fig 3), l'écart du point à la droite tracée B varie avec la forme de l'averse et en particulier est proportionnel à la quantité de pluie tombée pendant les 20 premières minutes.

Tout se passe comme si la première tranche du premier corps d'averse s'infiltrait toujours quelle que soit la quantité d'eau apportée et quelles que soient les intensités du début du corps d'averse.

Pour traduire ce phénomène, nous avons été amenés à prendre pour équation du ruissellement

$$XINT = N \cdot XPAR + SEUIL$$

N étant un paramètre déterminé par tâtonnement.

Résultats obtenus (tableau 1, fig 4)

L'ajustement entre les valeurs simulées et les valeurs réelles du ruissellement n'est pas très satisfaisant.

Il n'est cependant pas aussi peu encourageant que ne l'est l'examen brut de la figure 4.

Nous devons en effet tenir compte de certaines considérations qui rendent le travail difficile :

- Le calage du programme qui comporte un certain nombre de paramètres à ajuster par tâtonnement n'est pas simple. Comme tous les programmes de ce type il doit sans doute falloir une certaine habitude de maniement et il n'est pas certain que les résultats du graphique 4 correspondent au meilleur calage.

- Il faut tenir compte du fait que le bassin d'Ambatomainy est très perméable et que les crues utilisées dans notre travail ont des coefficients de ruissellement qui varient entre 2 et 20 % .

La récupération de ces quelques pourcents par élimination des fractions successives du reste de la pluie est nécessairement peu précis. On aboutirait sans doute à de meilleurs résultats sur un bassin ruisselant davantage.

5.1 Les écarts observés entre les valeurs réelles et les valeurs simulées

a) Toutes les valeurs simulées excessives par rapport aux valeurs vraies proviennent d'averses ayant des fortes intensités dans les 25 premières minutes du corps d'averse.

Cet écart est d'environ 5 mm et ne devrait pas augmenter pour les fortes crues puisqu'il provient d'une mauvaise connaissance des phénomènes dans la phase transitoire du début de l'averse.

Il semble bien que l'on se trouve en présence de la superposition de deux phénomènes distincts :

- phénomène de microperméabilité qui suit le processus décrit dans le programme (passage de l'état de rétention à l'état de saturation par l'apport d'un certain stock),
- phénomène de macroporosité en début d'averse correspondant à une forte perméabilité et à une infiltration proportionnelle à l'intensité de l'averse.

Ce résultat avait déjà été décrit par POURRUT sur des sols analogues du B.V. de la Tafaiña (cahiers de l'ORSTOM vol. VIII Année 1968).

b) Les écarts observés par défaut correspondent à des crues de fin de saison des pluies lorsque la nappe est au plus haut et que la tranche de sol au-dessus de la nappe est entièrement saturée. Dans ces conditions, la première couche du sol est elle-même presque saturée et la valeur du temps de ressuyage TRESO nécessaire pour permettre à cette couche de revenir de l'état de saturation à l'état de rétention augmente et peut atteindre une dizaine d'heures ou voire davantage puisque le sol ne peut alors se ressuyer que par restitution à la rivière sous forme d'écoulement hypodermique.

5.2 Valeur minimale du temps de saturation

La décroissance de la parabole "limite de percolation" de l'état de rétention (STOC = STOCK-IDEFI) à l'état de saturation (STOC = 0) dure 17 minutes. Ce temps minimal de saturation à partir de l'état de rétention est un paramètre de calage important dans notre programme, bien qu'il n'apparaisse pas de façon explicite, comme paramètre d'entrée.

Il se calcule de la façon suivante : (partant toujours des équations que fournit la parabole $X = \frac{AT^2}{3}$)

$$STOC = \frac{AT^3}{3} = \frac{XT}{3}$$

$$\frac{X \text{ PAR}}{X \text{ SEC}} = \frac{(STOCK-IDEFI)^{2/3}}{(STOCK)^{2/3}}$$

$$TSAT = \frac{3 (STOCK-IDEFI)}{X \text{ PAR}}$$

Le temps TSAT se détermine également par tâtonnements.

Etant donné la rapidité du temps de concentration de la crue sur nos bassins d'Ambatomainty, on peut considérer que cette valeur est un résultat intrinsèque aux sols rencontrés.

Par contre, sur des bassins plus importants, ce temps de décroissance de la parabole s'allonge en même temps que croît le temps de concentration de la crue sur le bassin. En effet les ruissellements provenant de sols non saturés à la périphérie du bassin se mélangent aux ruissellements provenant de sols saturés à proximité du bas fond et la courbe moyenne est l'enveloppe de toutes les courbes de ressuyage décalées dans le temps.

Sur le bassin de Korhogo par exemple, ce temps de décroissance de la partie transitoire de la courbe est d'environ 3 heures, de sorte que toutes les averses précipitent pendant ce temps alors que sur Ambatomainty on arrive très rapidement au régime permanent, c'est-à-dire à une capacité d'infiltration constante et égale à SEUIL.

Cette particularité limite la possibilité d'une comparaison des bassins entre eux qui soit indépendante de la superficie des bassins.

En conclusion, il semble qu'il existe sur un bassin donné une courbe de capacité d'absorption moyenne des sols unique quelle que soit la forme de l'averse, à quelques anomalies près liée à la macroperméabilité des sols. Le problème consiste à caler dans le temps le hétérogramme de l'averse par rapport à cette courbe en fonction des conditions initiales. Le présent programme était une tentative de résolution de ce problème.

ESSAI DE SIMULATION DU RUISSELLEMENT Fig - 1

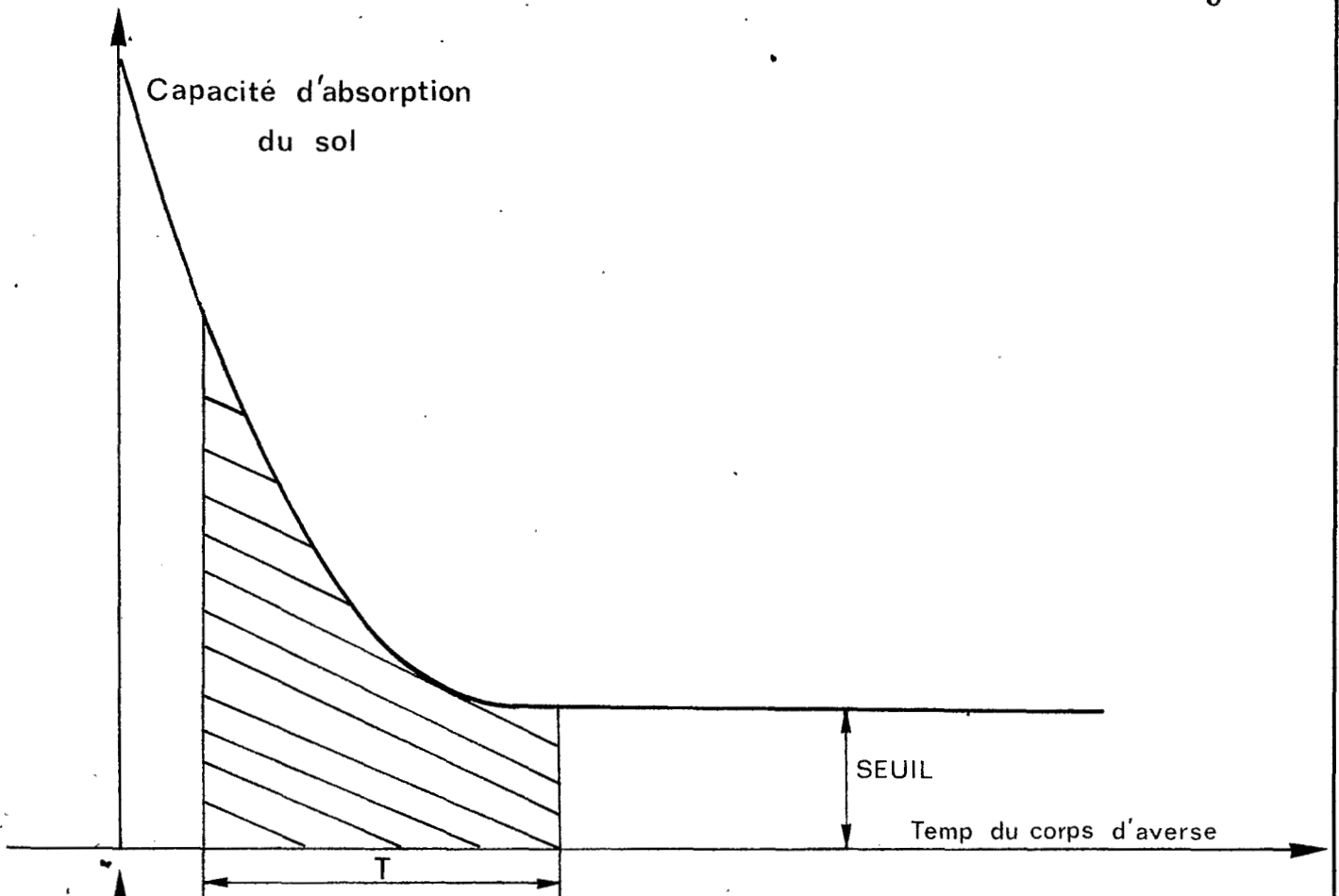
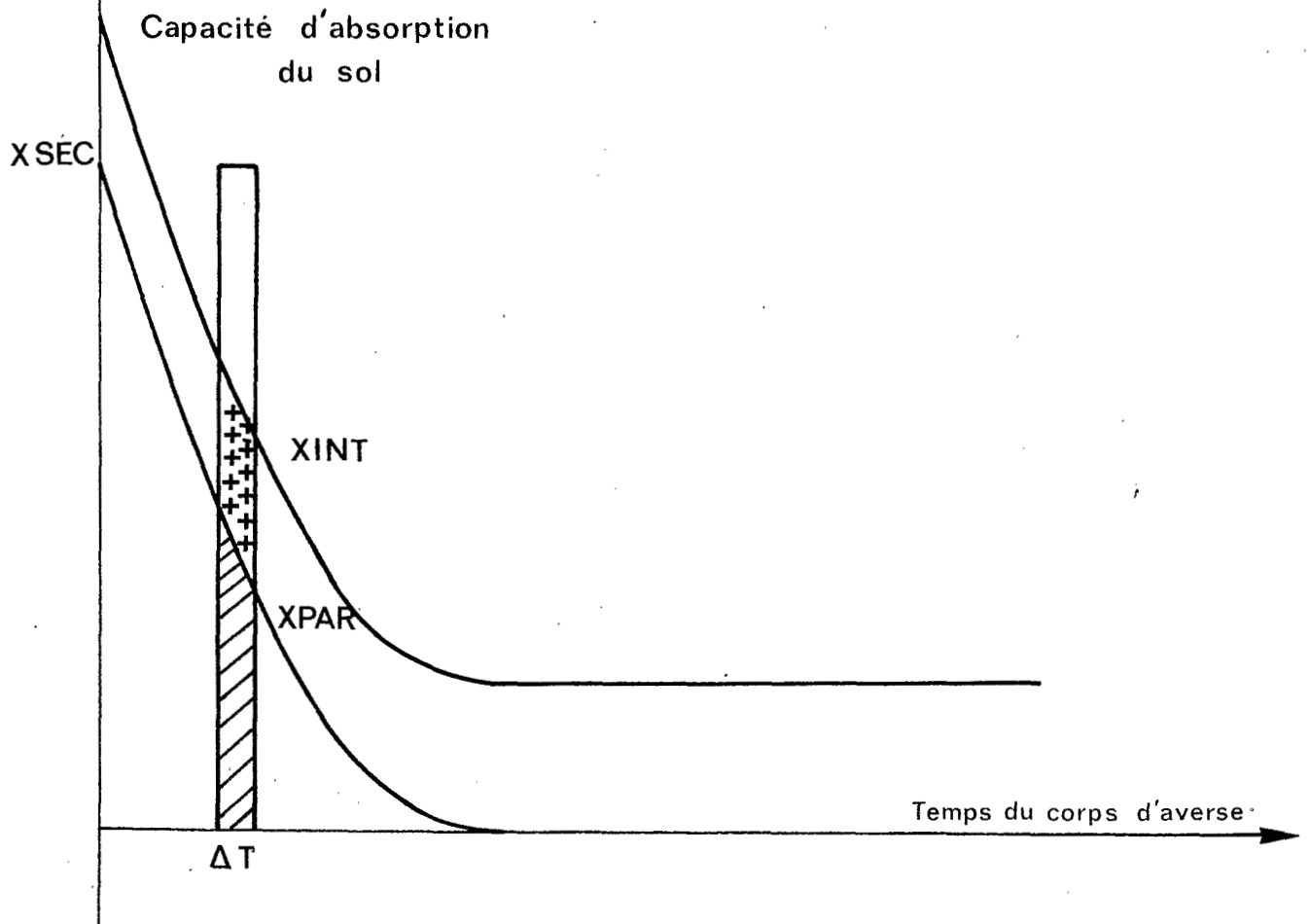
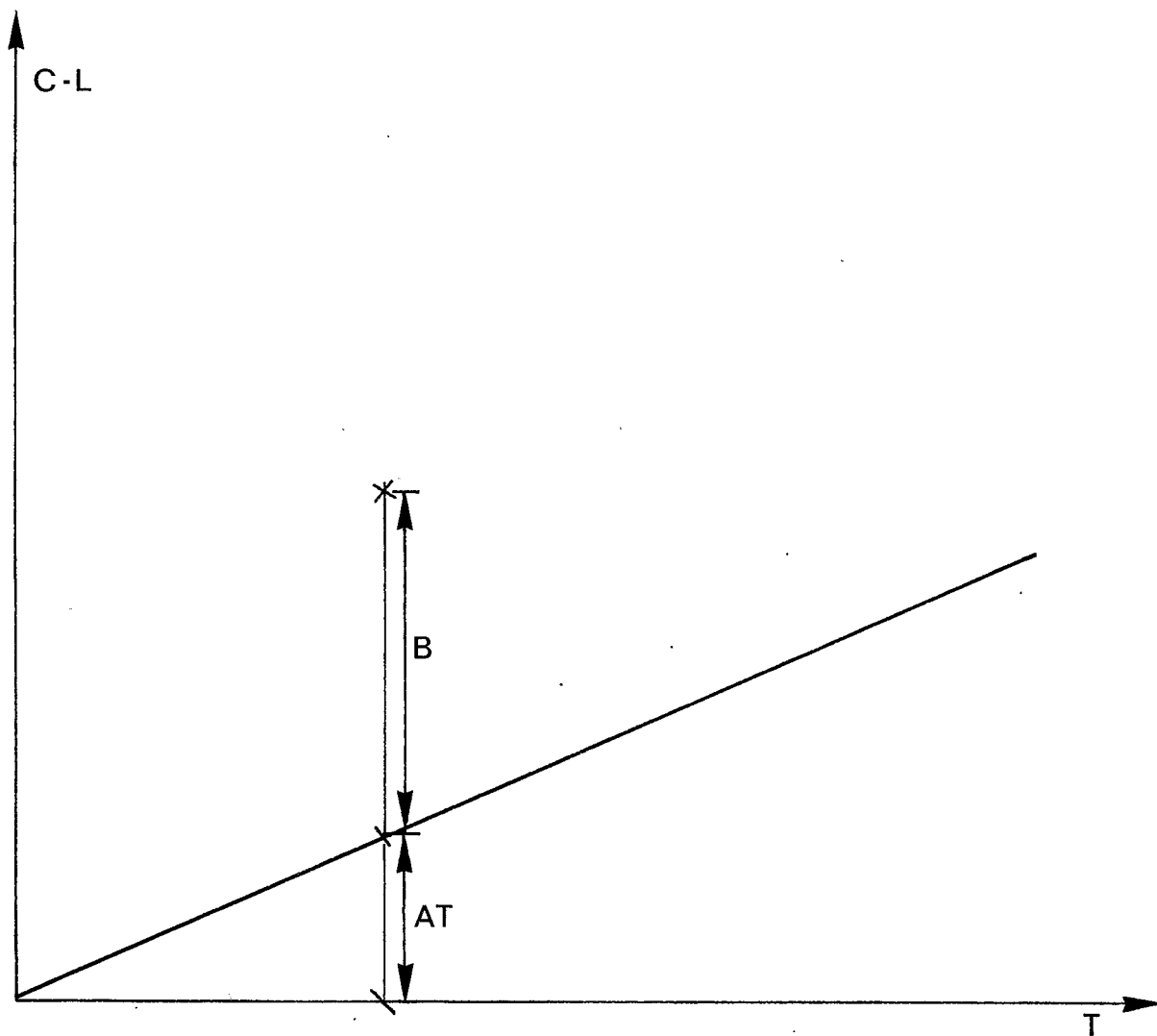


Fig - 2



SCHEMA DIRECTEUR DE BASE



ESSAI Simulation Volumes ruisselés

↑ 6

Corrélation entre les volumes ruisselés réels et simulés

AMBATOMAINTY SUD

Année - 72-73 et 74-75

