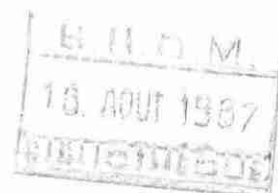




BRGM

analyse de très longues séries  
de niveaux piézométriques  
pour en déterminer la variabilité naturelle





analyse de très longues séries  
de niveaux piézométriques  
pour en déterminer la variabilité naturelle

J. Martin  
D. Thiery

juin 1987  
87 SGN 421 EAU

## RESUME

Le texte qui suit constitue une partie d'une recherche réalisée dans le cadre du contrat n°CLI-88-F (RS) entre la Communauté Economique Européenne et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières sur le thème : "Influence de la variabilité du climat sur les performances des méthodes d'évaluation des caractéristiques en eau pour les aménagements". Les performances des modèles globaux pluie-niveaux pour l'extension de séries temporelles de niveaux piézométriques ont été étudiées par l'analyse de huit très longues séries piézométriques situées dans les départements du Nord et du Pas de Calais. La période d'observations est de l'ordre de 80 ans (avec cependant un certain nombre de lacunes). Pour chacune de ces séries, on a réalisé un calage sur 3 périodes successives de 20 ans (1924/1943, 1944/1963 et 1964/1983). Chaque calage a été contrôlé en extension de données sur la période de contrôle de 50 ans environ. On a ainsi montré que pour tous les piézomètres (sauf 2 ou 3) l'extension de données permet d'évaluer correctement les caractéristiques statistiques réelles des niveaux de 80 ans à partir de 20 années de données. Dans tous les cas, le coefficient de prévision de Nash et Sutcliffe est supérieur à 0,70 sur la période de contrôle de 60 ans ce qui est satisfaisant et l'amplitude de variation à 80 % de la période de contrôle est bien prévu.

## **SOMMAIRE**

|                                                                                  | <b>Pages</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>INTRODUCTION</b>                                                              | <b>1</b>     |
| <b>1 - LES DONNEES DISPONIBLES</b>                                               | <b>3</b>     |
| 1.1 - Données piézométriques                                                     | 3            |
| 1.1.1 - Période d'observation des niveaux piézométriques                         | 3            |
| 1.1.2 - Examen critique des données de niveau                                    | 5            |
| 1.2 - Les données pluviométriques                                                | 5            |
| 1.3 - Evapotranspiration potentielle                                             | 7            |
| <b>2 - ANALYSE DES DONNEES</b>                                                   | <b>9</b>     |
| 2.1 - Précipitation                                                              | 9            |
| 2.1.1 - Contrôle de la série Lille Lesquin                                       | 9            |
| 2.1.2 - Raccord de la série Lille Ville - Lille Lesquin                          | 11           |
| 2.1.3 - Contrôle de la série complétée à Lille Ville                             | 11           |
| 2.1.4 - Conclusion                                                               | 13           |
| 2.2 - Niveaux observés                                                           | 13           |
| 2.3 - Niveau et précipitations observés                                          | 15           |
| <b>3 - PRINCIPE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE<br/>    PLUIE-NIVEAU</b> | <b>16</b>    |
| <b>4 - MODELISATION DE LA PERIODE TOTALE</b>                                     | <b>17</b>    |
| 4.1 - But de la modélisation de la période totale                                | 17           |
| 4.2 - Hypothèse de calcul                                                        | 17           |
| 4.3 - Paramètres du modèle                                                       | 17           |
| 4.4 - Calage du modèle                                                           | 18           |
| 4.5 - Résultats du calage                                                        | 21           |
| <b>5 - EXTENSION DE DONNEES</b>                                                  | <b>25</b>    |
| 5.1 - Principe de l'extension de données                                         | 25           |
| 5.2 - Résultats des calages partiels sur 20 ans d'observations                   | 25           |
| 5.3 - Efficacité de l'extension de donnée                                        | 25           |
| <b>CONCLUSION</b>                                                                | <b>32</b>    |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>                                               | <b>33</b>    |
| <b>ANNEXE</b>                                                                    | <b>35</b>    |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                 | Pages  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1 - Situation géographique des 8 piézomètres étudiés                                                                                                            | 2      |
| 2 - Niveaux mensuels observés sur la période 1901/1985 - Helemmes, Baisieux, Auchy, Tincques                                                                    | 4      |
| 3 - Niveaux mensuels observés sur la période 1901/1985 - Achicourt, Boisleux, Bully, Saint Pol                                                                  | 6      |
| 4 - Ecart cumulés des pluies à Lille Lesquin par rapport à la première composante principale des pluies à Boulogne, Dunkerque et St Quentin - Période 1951/1984 | 8      |
| 5 - Raccord des séries Lille Ville et Lille Lesquin                                                                                                             | 8      |
| 6 - Comparaison des écarts cumulés entre Lille, Paris et Orléans sur la période 1874-1984                                                                       | 10     |
| 7 - Niveaux moyens annuels des 8 piézomètres sélectionnés sur la période 1900-1983                                                                              | 12     |
| 8 - Comparaison des séries annuelles de niveau à Tincques et Achicourt et de pluie annuelle à Lille, Paris Monsouris et Orléans                                 | 14     |
| 9 - Calage sur la période 1901-1985 - Helemmes, Baisieux, Auchy, Tincques                                                                                       | 20     |
| 10 - Calage sur la période 1910-1985 - Achicourt, Boisleux, Bully, Saint Pol                                                                                    | 23     |
| 11 - Prévion des niveaux à Helemmes                                                                                                                             | 26     |
| 12 - Prévion des niveaux à Tincques                                                                                                                             | 26     |
| 13 - Prévion des niveaux à Achicourt                                                                                                                            | 27     |
| 14 - Prévion des niveaux à Boisleux                                                                                                                             | 27     |
| 15 - Prévion des niveaux à Saint Pol                                                                                                                            | 28     |
| 16 - Prévion des niveaux après calage sur 20 années d'observation                                                                                               | 30     |
| <br>Figure A1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA                                                                                                     | <br>42 |

## Liste des tableaux

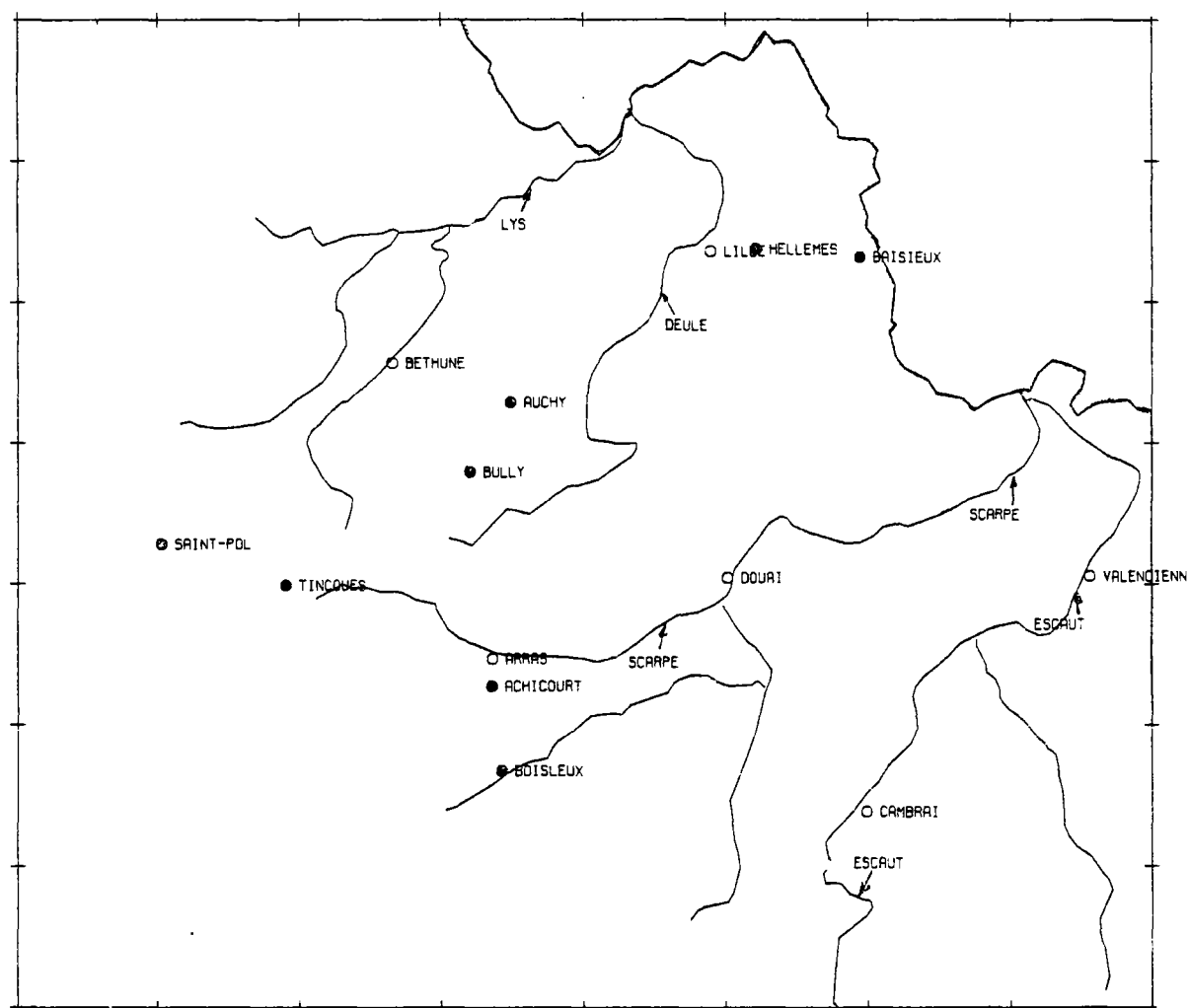
|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1 - Liste des piézomètres analysés                             | 3  |
| 2 - Paramètres du calage sur la période 1901/1983              | 22 |
| 3 - Caractéristique du calage sur la période 1901/1983         | 22 |
| 4 - Calages sur 20 années d'observation - Liste des paramètres | 24 |
| 5 - Efficacité de la prévion                                   | 29 |

## INTRODUCTION

La variabilité des précipitations alimentant les aquifères se traduit par une variabilité des niveaux piézométriques naturels qu'il est important de déterminer pour connaître les risques de défaillance d'aménagements situés à proximité. Ces défaillances peuvent être dues aussi bien à des niveaux trop bas (captages, plans d'eau qui s'assèchent) qu'à des niveaux trop élevés (terrains inondés, parkings inutilisables, fondations détériorées, etc...). Les séries d'observations piézométriques sont rarement disponibles pendant de très longues périodes et présentent généralement des séquences d'années de niveaux élevés ou de niveaux bas. Ces séquences sont bien évidemment provoquées par l'inertie des nappes qui tend à intégrer l'effet des recharges par les pluies (efficaces) au cours de plusieurs années successives. Il est donc extrêmement dangereux d'analyser directement une courte série piézométrique - qui peut intégrer une ou plusieurs séquences exceptionnelles - pour en déterminer les caractéristiques statistiques de la variabilité naturelle. On dispose cependant pratiquement toujours de longues séries de précipitations en tous lieux. Ces séries de précipitations peuvent servir à étendre les séries piézométriques au moyen d'un modèle global pluie-niveau. On obtient alors une série piézométrique suffisamment longue pour être analysée précisément. Cette démarche est plus classique pour l'analyse de séries de données de débits de rivières ou de débits de sources (J. Martin, D. Thiery, Note technique n°86/15 par exemple) et a été seulement abordée pour l'analyse de séries de niveaux piézométriques de courtes durées (J. Martin, D. Thiery, Note technique n°87/05 par exemple).

Le texte qui suit présente l'analyse de huit très longues séries de niveaux relatifs à des piézomètres situés dans les départements du Nord et du Pas de Calais avec évaluation des performances en extension de données.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du contrat n°CLI-88-F (RS) entre la Communauté Economique Européenne et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières.



**Figure 1 - Situation géographique des 8 piézomètres étudiés**

## 1 - LES DONNEES DISPONIBLES

### 1.1 - DONNEES PIEZOMETRIQUES

On dispose des relevés mensuels des niveaux piézométriques aux 8 piézomètres décrits dans le tableau 1 et dont la situation géographique est précisée sur la figure 1.

Ces données proviennent de la banque du sous-sol (BSS).

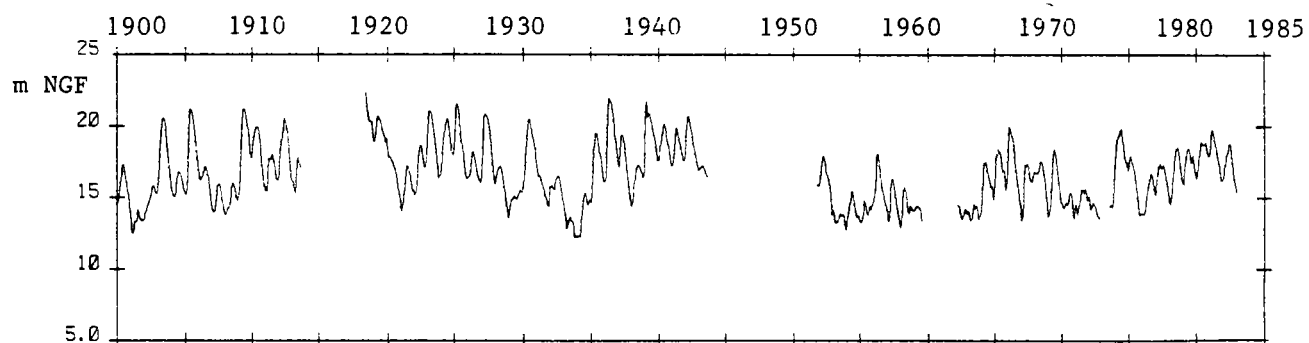
| Nom du piézomètre | Département   | Cote absolue du repère m NGF | National de l'indice référence |
|-------------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| Helemmes          | Nord          | 30.90                        | 14 - 7D - 0218                 |
| Baisieux          | Nord          | 27.70                        | 14 - 8D - 0177                 |
| Auchy             | Pas de Calais | 27.76                        | 19 - 3X - 0013                 |
| Tincques          | Pas de Calais | 116.50                       | 25 - 4X - 0003                 |
| Achicourt         | Pas de Calais | 62.62                        | 26 - 7X - 0050                 |
| Boisleux          | Pas de Calais | 82.00                        | 35 - 3X - 0055                 |
| Bully             | Pas de Calais | 57.40                        | 19 - 5X - 0093                 |
| Saint Pol         | Pas de Calais | 87.00                        | 25 - 3X - 0014                 |

Tableau 1 - Liste des piézomètres analysés

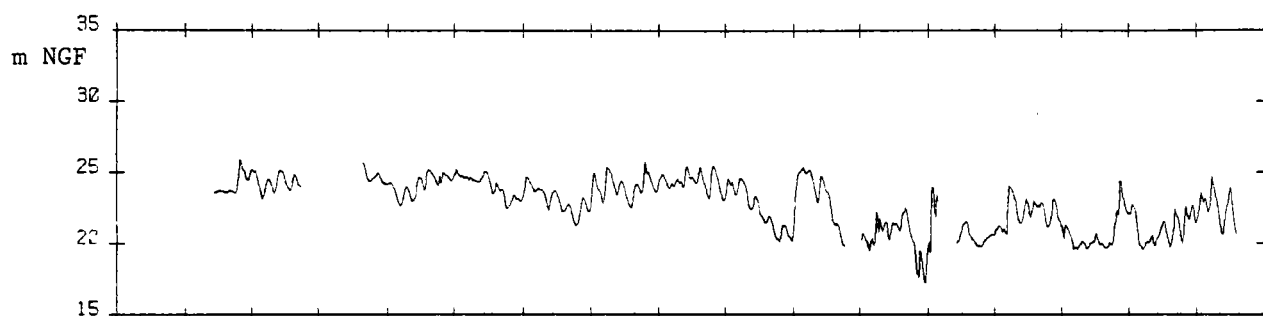
#### 1.1.1 - PERIODE D'OBSERVATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

La période choisie est la période de 1901/1985. En fait, à part le piézomètre Saint Pol, tous présentent des lacunes généralement pendant la période 1914/1918 et 1939/1945 (à cause des guerres bien entendu) mais aussi le plus souvent pendant la décennie 1955/1965. Les niveaux mensuels des 8 piézomètres ont été dessinés sur les figures 2 et 3 pour permettre un examen synoptique.

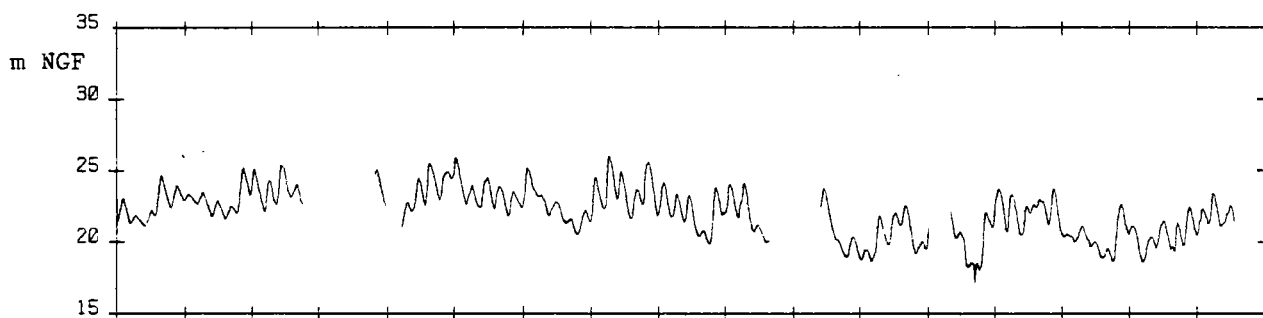




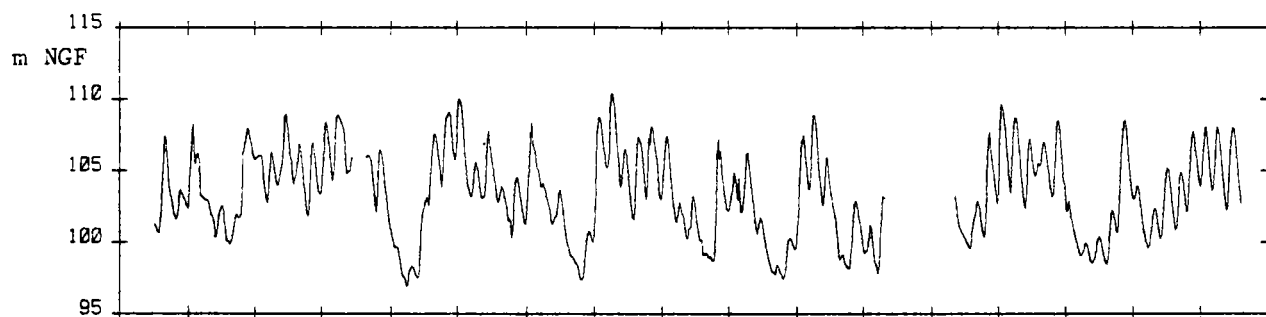
HELLEMES OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



BAISIEUX OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



AUCHY OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



TINCQUES OBSERVATIONS DE 1901 A 1985

**Figure 2 - Niveaux mensuels observés sur la période 1901-1985 :  
Hellemmes, Baisieux, Auchy, Tincques**

### 1.1.2 - EXAMEN CRITIQUE DES DONNEES DE NIVEAU (fig. 2 et 3)

#### \* Piézomètre Baisieux

Variations brutales avec cotes anormalement basses en 1959/60.

#### \* Piézomètre Bully

Remontée très sensible de 1901 à 1910, ce qui n'est observé sur aucun autre piézomètre.

#### \* Tous les piézomètres

Niveaux très élevés pendant la période 1965/1971. Ceci est encore plus net pour les piézomètres Boisieux et Bully dont les mesures reprennent après 10 années d'interruption.

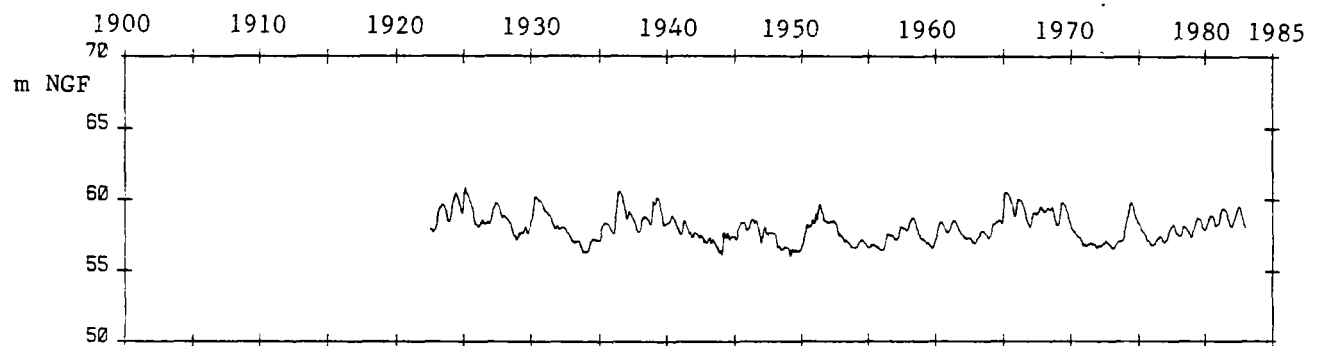
## 1.2 - LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Compte tenu de la période d'observations des niveaux de 1901 à 1985 et dans un but d'extension de données on a recherché uniquement de très longues séries de pluies. Seule la série pluviométrique de Lille correspondait à ces critères. Les données de pluies mensuelles à Lille proviennent de la Météorologie Nationale.

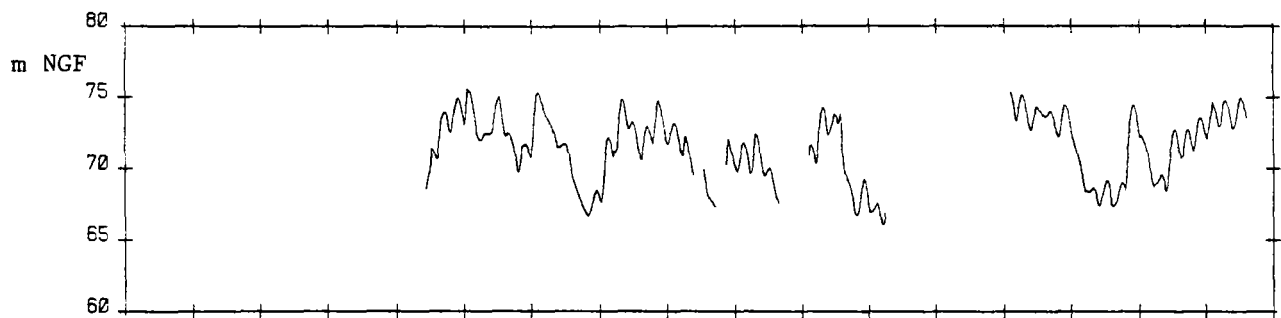
En fait, on ne disposait pas dans le cadre de cette recherche d'une série de pluies continues au même poste de Lille mais de 2 séries observées aux postes suivants :

| Poste         | Période   |
|---------------|-----------|
| Lille Ville   | 1875/1960 |
| Lille Lesquin | 1945/1983 |

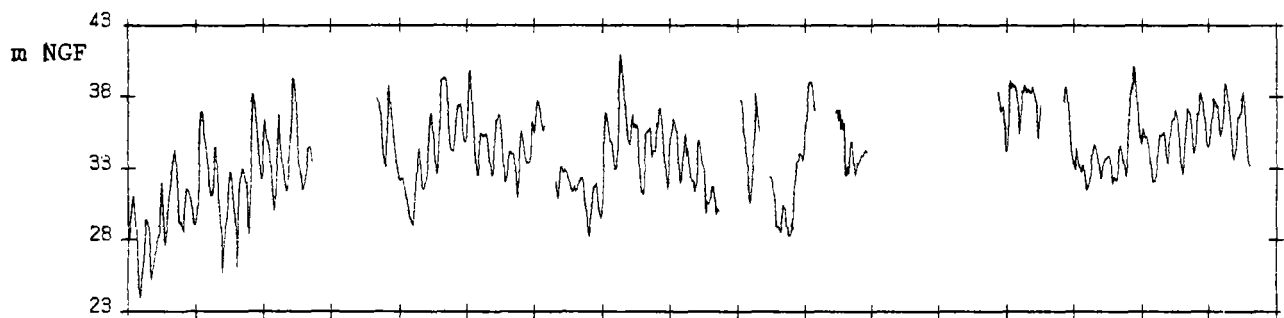
Dans un premier temps, compte tenu de la proximité des deux stations, nous avons tout simplement prolongé la série de Lille Ville par la série de Lille Lesquin de 1961 à 1983. Nous montrerons plus loin que ces séries ne sont pas tout à fait identiques ni parfaitement homogènes ce qui peut avoir des conséquences pour modéliser une nappe très amortie qui intègre la pluie sur de nombreuses années et est donc sensible à une faible variation systématique.



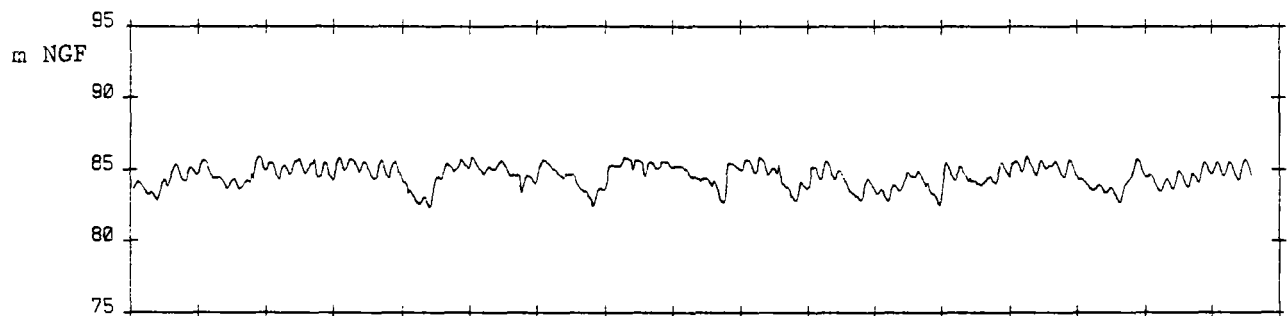
ACHICOURT OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



BOISIEUX OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



BULLY OBSERVATIONS DE 1901 A 1985



SAINT-POL OBSERVATIONS DE 1901 A 1985

**Figure 3 - Niveaux mensuels observés sur la période 1901-1985 :  
Achicourt, Boisieux, Bully, Saint Pol**

### 1.3 - EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'évapotranspiration potentielle a été calculée par la formule mensuelle de **Turc**. Les données nécessaires à ce calcul sont (dans ce climat humide) pour chaque mois :

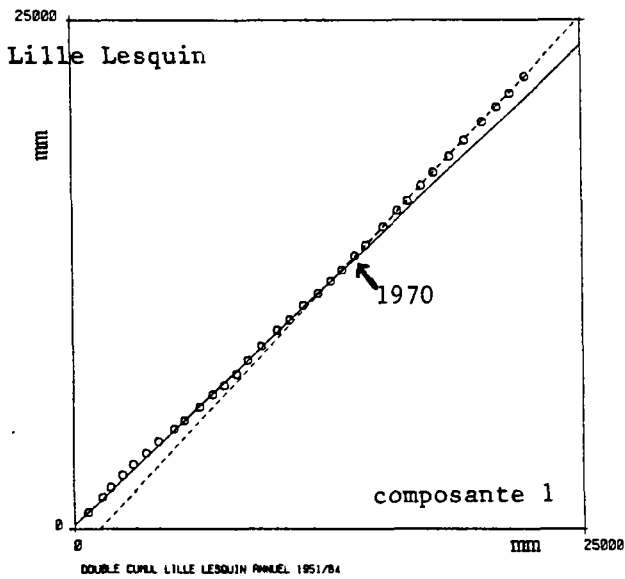
- la température moyenne mensuelle de l'air,
- et la durée moyenne de l'insolation.

Ces données n'étaient pas disponibles sur une très longue période, on a donc calculé l'ETP moyenne des 12 mois de l'année sur une courte période d'observation et on a considéré que la variation d'une année à l'autre était faible.

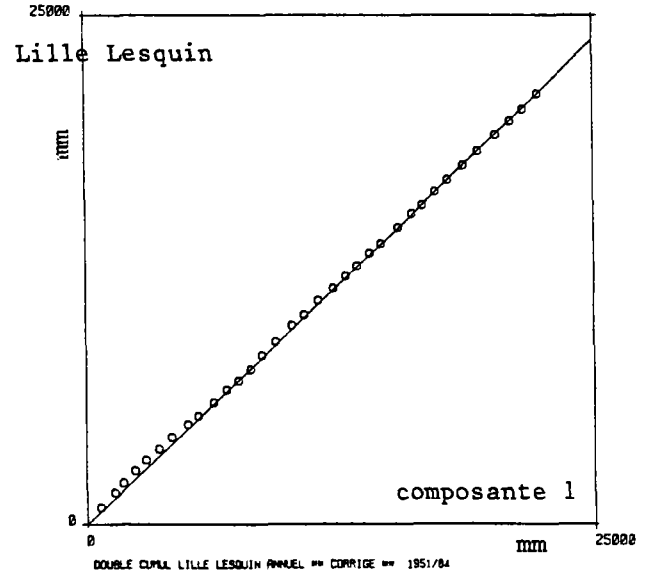
En fait, différentes applications ont montré que cette approximation n'introduisait généralement qu'une faible erreur sur les niveaux modélisés puisque, en hiver l'évapotranspiration potentielle est de toute façon très faible par rapport aux pluies et en été, au contraire, elle est toujours beaucoup plus élevée que les pluies mensuelles mais son effet est limité par la capacité de rétention du sol qui s'assèche rapidement.

La série des valeurs utilisées est la suivante (en mm/mois) :

| J | F  | M  | A  | M  | J  | J  | A  | S  | O  | N  | D |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 7 | 11 | 32 | 58 | 81 | 97 | 97 | 83 | 61 | 34 | 14 | 7 |

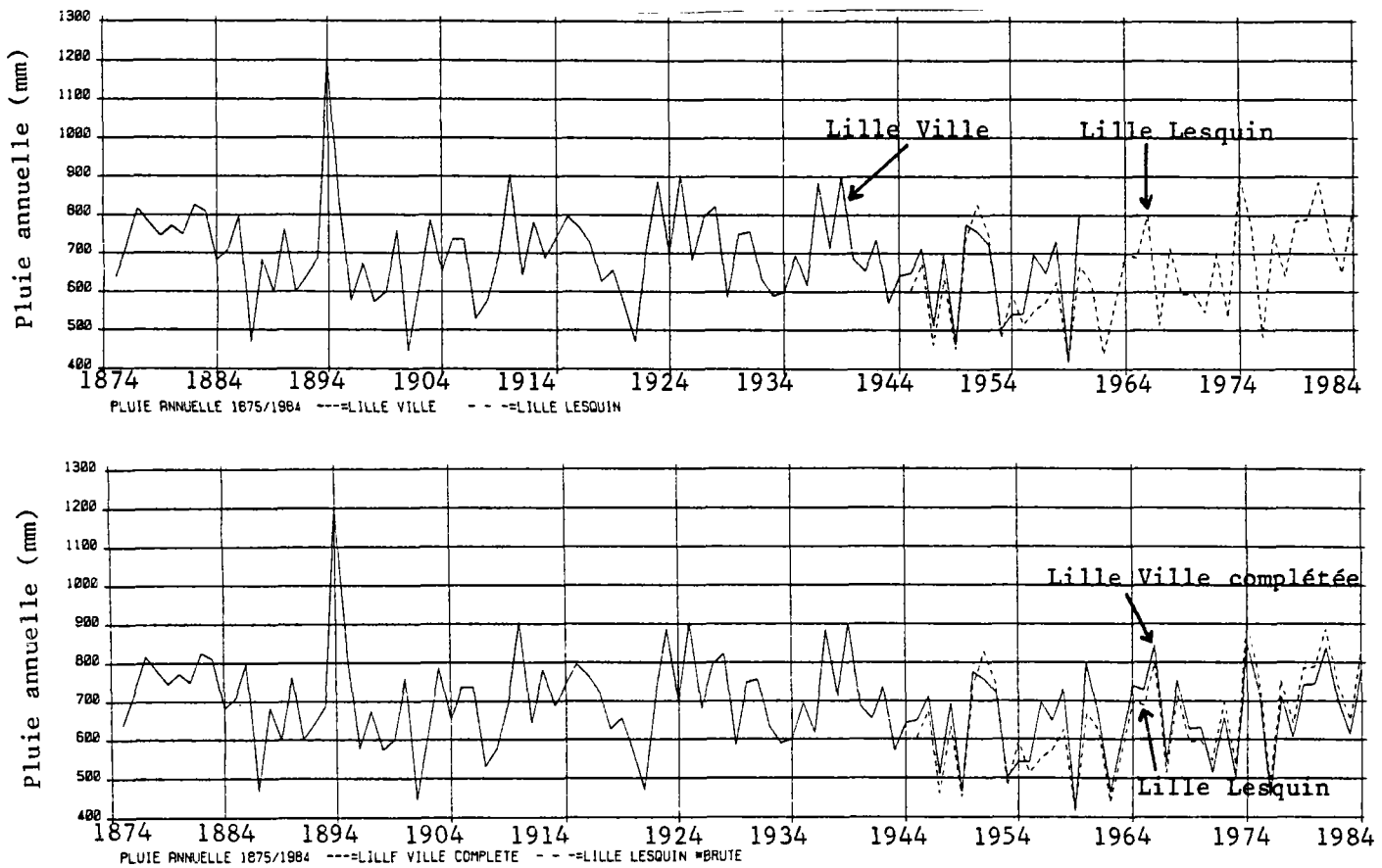


Avant correction



Après correction

**Figure 4 - Ecartés cumulés des pluies à Lille Lesquin par rapport à la première composante principale des pluies à Boulogne, Dunkerque et St Quentin - Période 1951-1984**



**Figure 5 - Raccord des séries Lille Ville et Lille Lesquin**

## 2 - ANALYSE DES DONNEES

### 2.1 - PRECIPITATION

#### 2.1.1 - CONTROLE DE LA SERIE LILLE LESQUIN

Un contrôle de la série Lille Lesquin a été réalisé, par double cumul sur les pluies annuelles de la période 1951/1984. Ce contrôle a été réalisé par comparaison avec la première composante principale des 3 postes suivants situés dans la même région :

Boulogne  
Dunkerque  
Saint Quentin

La matrice de corrélation des 4 stations s'écrit :

|               | Lille | Boulogne | Dunkerque | St Quentin |
|---------------|-------|----------|-----------|------------|
| Lille Lesquin | 1.00  |          |           |            |
| Boulogne      | 0.44  | 1.00     |           |            |
| Dunkerque     | 0.58  | 0.88     | 1.00      |            |
| St Quentin    | 0.74  | 0.84     | 0.81      | 1.00       |

Le double cumul fait apparaître une cassure nette à partir de 1970 (fig. 4). Par rapport à la première composante principale COMP1 - qui, résultant de 3 postes, ne doit pas être affectée de tendance systématique - on établit les relations suivantes :

LESQ = 0,942 COMP1 + 214 mm de 1951 à 1970 (20 ans)

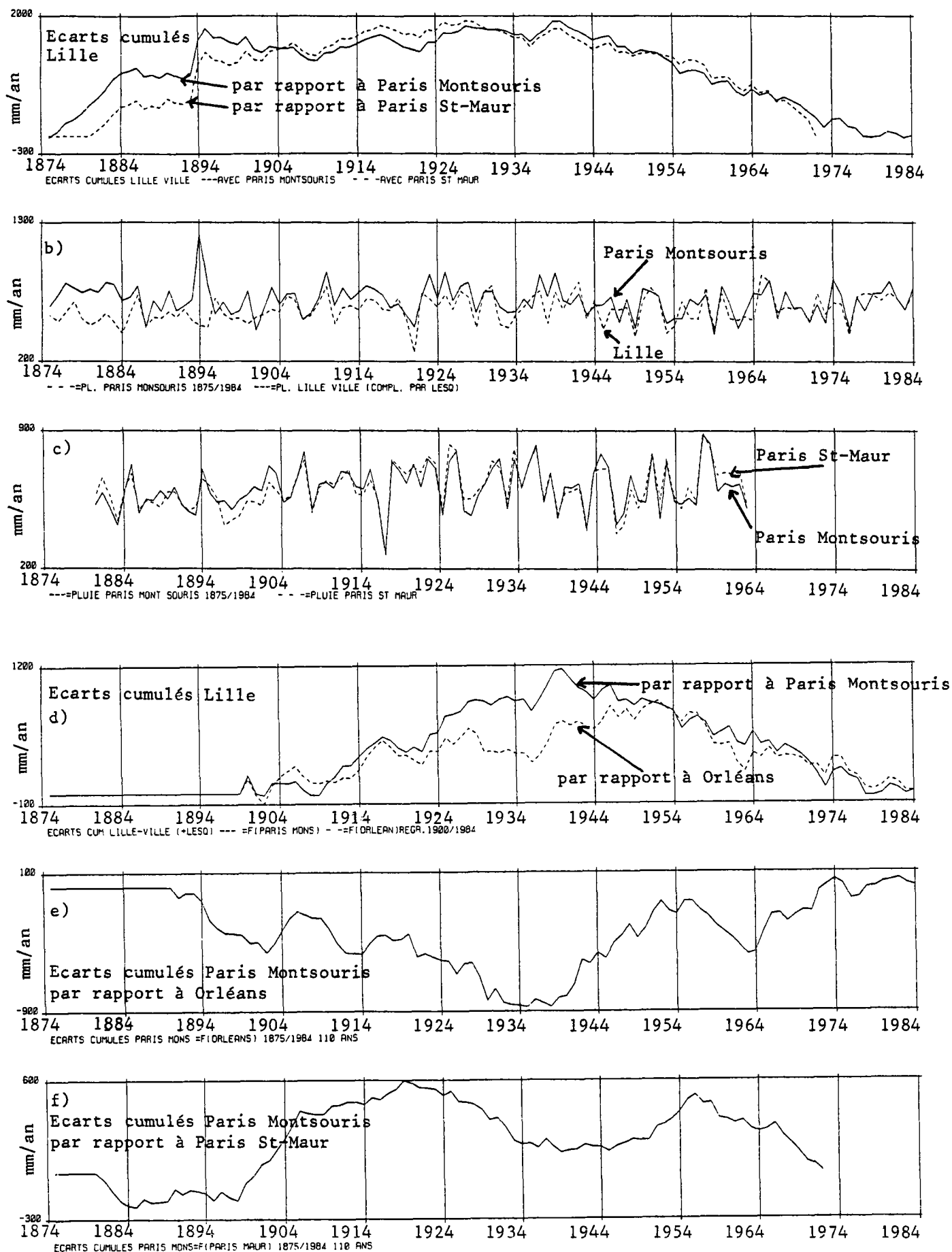
LESQ = 1,055 COMP1 - 1232 mm de 1970 à 1984 (15 ans)

avec LESQ = pluie annuelle à Lille Lesquin

Pour tenir compte de cette tendance - qui provoque une erreur de 10 %-, on a corrigé la première période (1951-1970) en éliminant COMP1 soit

$$\text{LESQ } 1951/70 = 0.893 \text{ LESQ } 1970/84 + 1314 \text{ mm}$$

voir figure 4



**Figure 6 - Comparaison des écarts cumulés entre Lille, Paris et Orléans sur la période 1874-1984**

### **2.1.2 - RACCORD DE LA SERIE LILLE VILLE - LILLE LESQUIN**

Après avoir homogénéisé la série de Lille Lesquin on l'a comparée avec la série de Lille Ville qui est observée de 1875 à 1960 soit une période commune 1945/1960 de 16 ans. Une régression simple sur les pluies annuelles a conduit à la relation :

$$\text{Lille Ville} = 0,9045 \text{ Lille Lesquin} + 95 \text{ mm/an}$$

avec un coefficient de corrélation de 0,88

ou encore en imposant une constante à l'origine nulle, pour permettre une correction mensuelle sans constante :

$$\text{Lille Ville} = 1,058 \text{ Lille Lesquin}$$

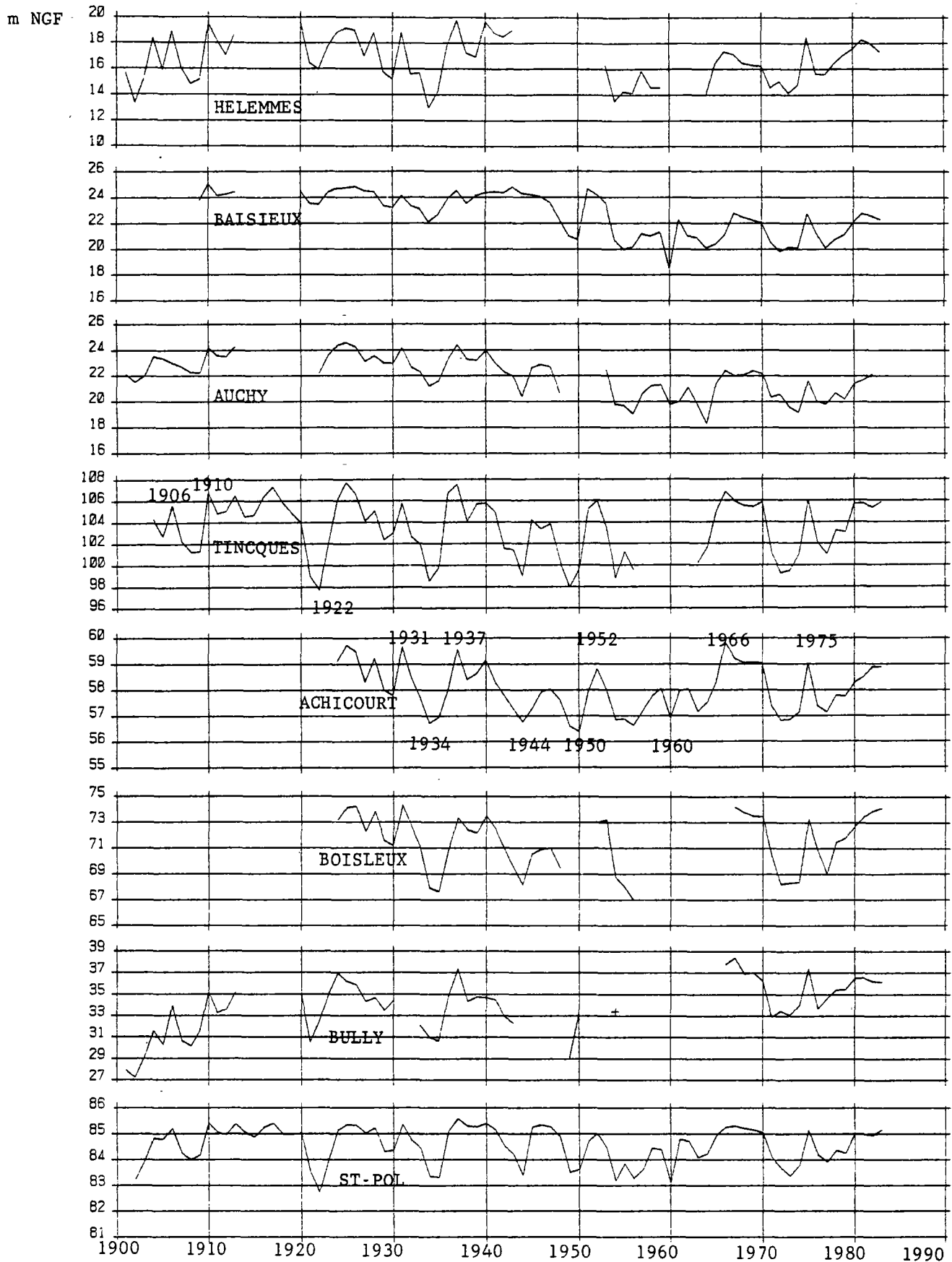
avec un coefficient de corrélation de 0,86.

Une série a donc été formée à Lille Ville en appliquant le facteur 1,058 à la série de Lille Lesquin homogénéisée à partir de 1961 (fig. 5).

### **2.1.3 - CONTROLE DE LA SERIE COMPLETEE A LILLE VILLE**

Un contrôle par double cumul a été réalisé entre la série de Lille Ville et la série de Paris Monsouris. La figure 6-a montre une décroissance systématique à partir de 1940 aussi bien en comparant la série de Lille par rapport à Paris Monsouris qu'à Paris St Maur. La figure 6-b montre bien que les pluies annuelles sont beaucoup plus élevées à Lille de 1874 à 1940. La figure 6-c présente la comparaison des séries Paris Monsouris et Paris St Maur. Ces 2 séries sont comparables et ne présentent pas d'écart systématique. Il apparaît donc que l'erreur systématique est sur Lille et non sur Paris. Pour le vérifier on a également étudié les écarts cumulés avec le poste d'Orléans. La figure 6-d confirme des précipitations plus faibles à Lille systématiquement à partir de 1950 ; la figure 6-e fait cependant apparaître par rapport à Orléans des précipitations à Paris plus fortes à partir de 1940.





**Figure 7 - Niveaux moyens annuels des 8 piézomètres sélectionnés  
sur la période 1900-1983**

### 2.1.4 - CONCLUSION

Il semble que la série de Lille présente des pluies systématiquement plus faibles à partir de 1940 ou 1950 : ceci est observé en comparant les pluies de Lille avec celles de Paris Monsouris, Paris St Maur et d'Orléans. (Cependant la comparaison des séries Paris et Orléans montre que ce pourrait être la série de Paris Monsouris qui est systématiquement légèrement trop forte à partir de 1940).

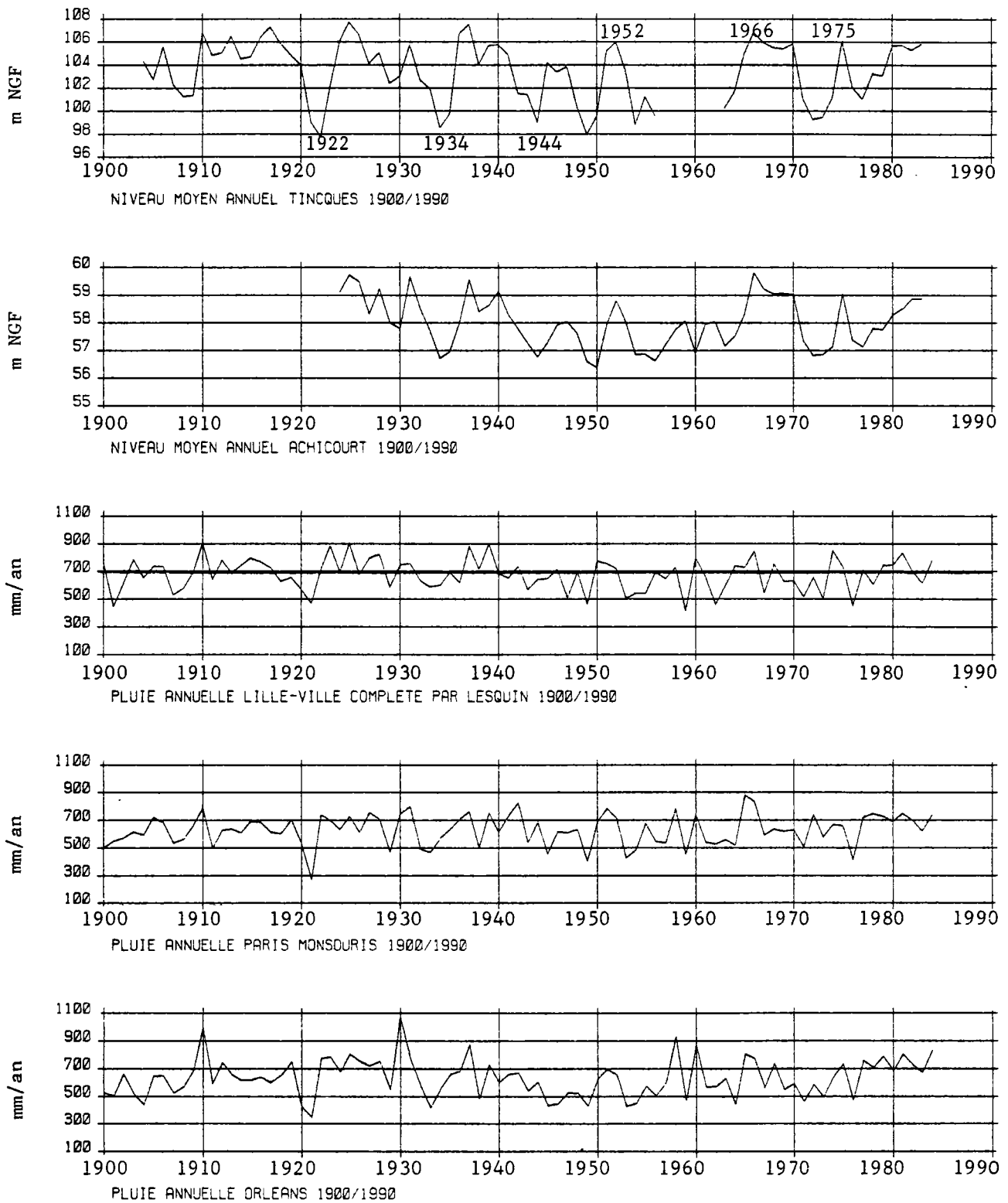
### 2.2 - NIVEAUX OBSERVES

On a tracé sur la figure 7 la comparaison des niveaux moyens annuels aux 8 piézomètres sélectionnés. Cette figure montre des évolutions assez semblables avec des pics et des creux parfaitement semblables. Les années présentant des pics très nets (pour tous les piézomètres) sont : 1931, 1937, 1952, 1966 et 1975. Les années présentant des creux nets sont : 1934, 1944, 1950, 1960, 1977. Une analyse en composantes principales des niveaux moyens annuels a produit la matrice de corrélation suivante sur les 27 années communes :

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| HELL | 1.00 |      |      |      |      |      |      |      |
| BAIS | 0.65 | 1.00 |      |      |      |      |      |      |
| AUCH | 0.66 | 0.95 | 1.00 |      |      |      |      |      |
| TINC | 0.92 | 0.69 | 0.68 | 1.00 |      |      |      |      |
| ACHI | 0.90 | 0.74 | 0.76 | 0.92 | 1.00 |      |      |      |
| BOIS | 0.86 | 0.61 | 0.59 | 0.89 | 0.93 | 1.00 |      |      |
| BULL | 0.75 | 0.26 | 0.29 | 0.81 | 0.76 | 0.79 | 1.00 |      |
| SPOL | 0.91 | 0.72 | 0.72 | 0.95 | 0.92 | 0.91 | 0.74 | 1.00 |
|      | HELL | BAIS | AUCH | TINC | ACHI | BOIS | BULL | SPOL |

**Matrice de corrélation des niveaux moyens annuels**

Les projections (sous forme de coefficients de corrélation) sur les 3 axes principaux sont les suivantes :



**Figure 8 - Comparaison des séries annuelles de niveau à Tincques et Achicourt et de pluie annuelle à Lille, Paris Monsouris et Orléans**

| <b>Axe propre</b><br><b>Nom de la variable</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
|------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>HELL</b>                                    | 0.936    | - 0.114  | 0.061    |
| <b>BAIS</b>                                    | 0.781    | 0.602    | - 0.013  |
| <b>AUCH</b>                                    | 0.784    | 0.587    | - 0.145  |
| <b>TINC</b>                                    | 0.967    | - 0.123  | - 0.065  |
| <b>ACHI</b>                                    | 0.975    | - 0.025  | 0.025    |
| <b>BOIS</b>                                    | 0.929    | - 0.202  | 0.227    |
| <b>BULL</b>                                    | 0.765    | - 0.588  | - 0.241  |
| <b>SPOL</b>                                    | 0.968    | - 0.044  | 0.081    |

### **Projection des niveaux annuels sur les 3 axes principaux**

On voit ainsi apparaître un très net effet d'abondance sur la composante n°1 qui explique 80 % de la variance. La composante n°2 - qui explique 14 % de la variance montre une opposition entre **Bully** d'une part et **Baisieux** et **Auchy** d'autre part.

### **2.3 - NIVEAU ET PRECIPITATIONS OBSERVES**

La figure 8 permet de comparer les niveaux annuels observés à **Tincques** et **Achicourt** et les précipitations annuelles observées aux 3 postes **Lille**, **Paris Monsouris** et **Orléans**. On retrouve bien les mêmes années abondantes et déficitaires, généralement 1 an en retard pour les niveaux, à cause des étiages tardifs. Cependant les variations sur les niveaux sont beaucoup plus marquées et autocorrélées. Cette comparaison montre que, en l'absence d'un modèle il n'est pas possible de prévoir le niveau annuel à partir des pluies annuelles.

### 3 - PRINCIPE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE PLUIE-NIVEAU

Chacun des piézomètres a été modélisé séparément à partir des pluies et des évapotranspirations potentielles avec le modèle hydrologique global **GARDENIA** du BRGM décrit en annexe 1. Le modèle **GARDENIA** réalise à chaque pas de temps un bilan global sur la zone d'alimentation de la nappe dont le piézomètre reflète le niveau. Le bilan est réalisé entre les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et le ruissellement et l'infiltration. Compte tenu des données disponibles, de l'inertie de la nappe qui conduit à des niveaux amortis, et du volume de calculs, on a choisi un pas de temps mensuel pour toutes les données. On a tout d'abord modélisé la période totale (pour analyser la cohérence des données) puis on a réalisé des calages sur des périodes successives de 20 ans avec contrôle de l'extension sur les 50 à 70 ans extérieurs à la période de calage.

## 4 - MODELISATION DE LA PERIODE TOTALE

### 4.1 - BUT DE LA MODELISATION DE LA PERIODE TOTALE

Une première modélisation a été réalisée en ajustant le modèle séparément sur les données de chaque piézomètre en prenant toutes les données disponibles pour réaliser le calage. Cette première simulation a pour but de montrer s'il est possible de simuler une longue période (de l'ordre de 80 ans) avec un même jeu de données et constitue en fait une analyse de cohérence pour chaque piézomètre.

### 4.2 - HYPOTHESES DE CALCUL

Pour cette modélisation, on a fait l'hypothèse que le ruissellement était négligeable et que la totalité de la pluie restant après action de l'évapotranspiration (réelle) - la pluie dite "efficace" - percolait à travers la zone non saturée pour recharger la nappe. Il est admis que, dans cette région, le ruissellement direct (c'est-à-dire sans transit par la nappe) n'est observé que pendant de très fortes pluies et ne dépasse pas quelques pourcents du débit des cours d'eau (c'est-à-dire quelques pourcents de la pluie efficace).

### 4.3 - PARAMETRES DU MODELE

Moyennant cette hypothèse, le modèle ne fait intervenir, pour chaque secteur modélisé, que 5 paramètres :

- . La **capacité de rétention du sol** (exprimée en mm d'eau). La pluie ne peut percoler que quand cette capacité est saturée ; c'est le seul paramètre qui règle la pluie efficace, donc l'évapotranspiration réelle (fonction "production").

- . Le **temps de demi-percolation** (exprimé en mois). C'est lui qui règle la rapidité avec laquelle s'effectue le transit à travers la zone non saturée.

- . Le **temps de demi-tarissement** (exprimé en mois). C'est lui qui règle la forme des courbes de tarissement exponentiel du niveau vers le niveau de base local.

Ce sont les temps de demi-tarissement et de demi-percolation qui règlent la fonction "transfert" c'est-à-dire l'étalement dans le temps de la pluie efficace.

. **Le coefficient d'emmagasinement global** (exprimé en %) : c'est lui qui règle l'amplitude des niveaux piézométriques pour une recharge donnée en fonction de la porosité efficace de l'aquifère (dans la zone saturée). Ce coefficient d'emmagasinement global n'est égal au coefficient d'emmagasinement en nappe libre ou à la porosité efficace uniquement si le piézomètre est situé loin d'un cours d'eau, sur une crête ou un dôme piézométrique. Dans le cas contraire, le coefficient d'emmagasinement global EMM est relié au coefficient d'emmagasinement S de par la relation

$$EMM = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{S}{\left(x' - \frac{x'^2}{2}\right)}$$

$x'$  étant le rapport de la distance rivière - piézomètre à la distance rivière - crête piézométrique

. **Le niveau de base local** (exprimé en mètres NGF c'est-à-dire en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer). C'est le niveau théorique qui serait atteint au bout d'une très longue période sans précipitations efficaces. Il est conditionné par la cote des cours d'eau voisins. Le niveau de base local correspond à un niveau de base dans des conditions "actuelles" et il pourrait être déterminé (théoriquement) en analysant les tarissements les plus prononcés en ajustant sa cote de façon à obtenir une décroissance exponentielle. (Il est bien évident qu'il ne correspond pas à une période "infinie" sans pluies efficaces car les cours d'eau s'assècheraient en même temps que la nappe et le niveau de base changerait.

#### 4.4 - CALAGE DU MODELE

En théorie, le calage du modèle devrait être très simple.

##### *Capacité de rétention du sol*

Il suffirait de comparer la série de pluies (auxquelles on a retranché l'évapotranspiration potentielle) à celle des niveaux pour déterminer combien de millimètres de pluie sont nécessaires avant une remontée de niveaux à l'automne.

En fait, cette confrontation est rendue difficile (surtout avec des données mensuelles) par le temps de percolation qui agit comme un coefficient de diffusion et masque la remontée qui est progressive au lieu d'être brutale.

### ***Coefficient d'emmagasinement***

Il suffirait d'un pompage d'essai. En fait la valeur à introduire dans le modèle correspond plutôt à une porosité et si la nappe est localement captive il faudrait utiliser le coefficient d'emmagasinement en nappe libre des affleurements sur lesquels se recharge la nappe.

### ***Niveau de base***

Il suffirait d'essayer différentes valeurs (par essais successifs) et de tracer la différence niveau moins niveau de base en fonction du temps jusqu'à obtenir des décroissances linéaires (correspondant à un tarissement exponentiel) au cours des étiages les plus prononcés. En pratique dans les climats tempérés - surtout au Nord de la France -, on n'observe généralement pas d'étiages prononcés pendant une période suffisamment longue compte tenu de l'effet du temps de percolation (qui prolonge la recharge).

### ***Temps de demi tarissement***

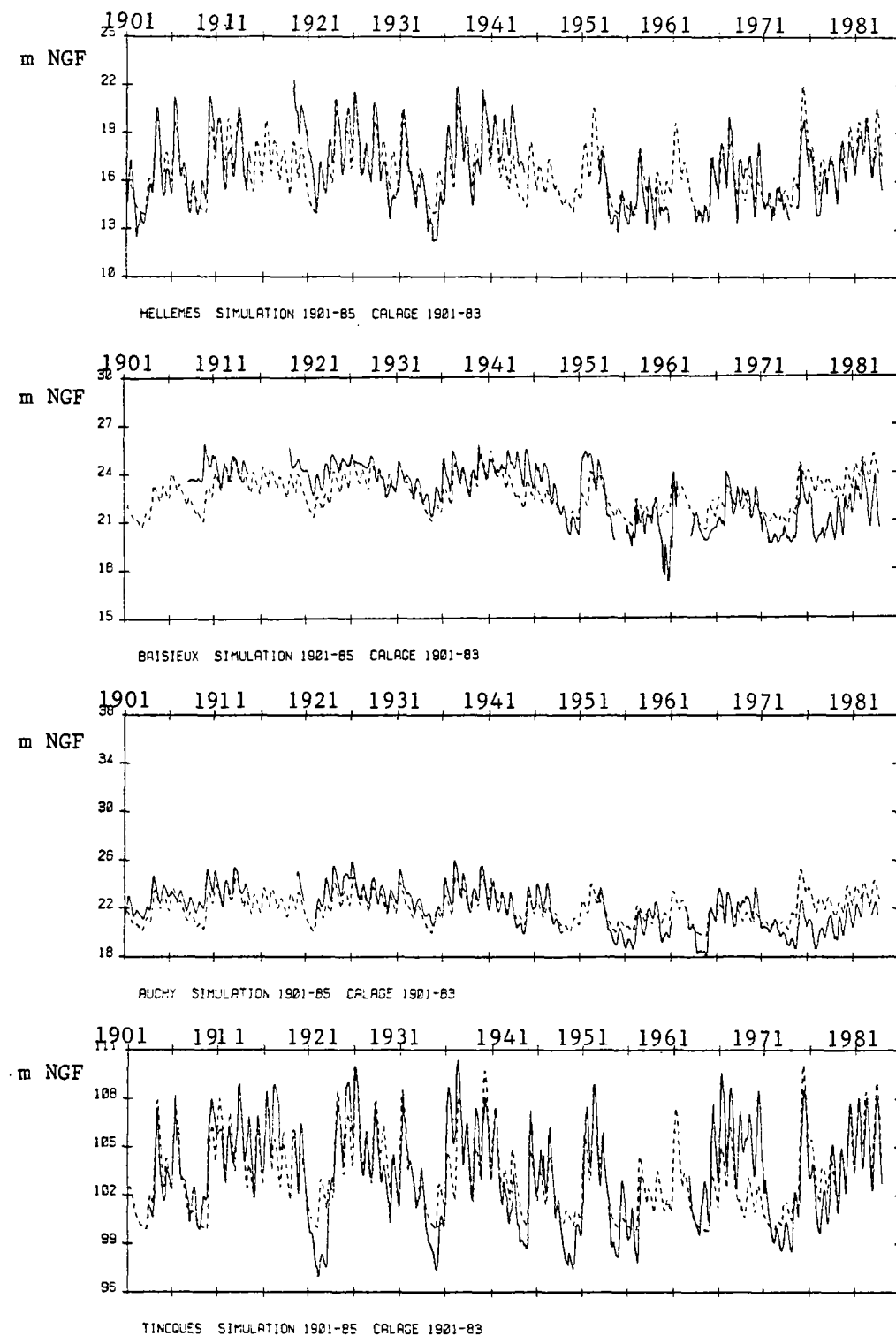
Il suffirait après avoir déterminé le niveau de base de déterminer la constante de temps  $TR$  de l'exponentielle ou bien encore, si on représente le système par un aquifère bordé par un cours d'eau rectiligne, d'après la transmissivité  $T$  de l'aquifère et la distance  $L$  du cours d'eau à la crête piézométrique :

$$TR = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{L^2 S}{T} = 0.405 \frac{L^2 S}{T}$$

En pratique, la première méthode donne un ordre de grandeur du temps de demi tarissement mais la deuxième est peu précise compte tenu de la variabilité de la transmissivité sur l'aquifère sur la zone comprise entre le cours d'eau et la crête piézométrique.

On voit ainsi qu'en théorie on pourrait déterminer facilement 4 des 5 paramètres mais qu'en pratique c'est difficilement réalisable compte tenu de l'inertie de la nappe qui amortit ses réactions aux pluies efficaces. Chaque paramètre serait alors déterminé avec une forte incertitude qui ne permettrait pas une bonne simulation des niveaux observés puisque ces paramètres seraient incohérents entre eux. D'autre part, on montre facilement - qu'avec l'hypothèse d'un ruissellement négligeable - on obtient des niveaux quasi identiques si on choisit une capacité de rétention plus faible qui produit une pluie efficace multipliée par un facteur  $k$  associée à un coefficient d'emmagasinement multiplié par le même facteur  $k$ . On n'observerait qu'un léger décalage dans le temps (puisque la capacité de rétention se sature plus vite) qui serait masqué par l'amortis-





**Figure 9 - Calage sur la période 1901-1985 :  
Hellemes, Baisieux, Auchy, Tincques**

sement dû à l'inertie de la nappe. On montre également qu'on obtient - toujours avec l'hypothèse d'un ruissellement négligeable - deux simulations absolument identiques pour deux jeux de paramètres obtenus en permutant les temps de demi-percolation et de demi-tarissement.

| Paramètres                   | Jeu 1 | Jeu 2   |
|------------------------------|-------|---------|
| Temps de demi-percolation    | TP    | TT      |
| Temps de demi-tarissement    | TT    | TP      |
| Coefficient d'emmagasinement | S     | S.TP/TT |

Ceci est dû au fait qu'une percolation rapide associée à un tarissement lent donne des effets proportionnels à une percolation lente associée à un tarissement rapide. Si les temps de demi percolation et de demi tarissement sont très différents il sera généralement possible de trancher en comparant les deux valeurs du coefficient d'emmagasinement possibles avec celles provenant d'un pompage d'essai. Si les deux valeurs sont peu différentes - de l'ordre d'un facteur 2, - il ne sera pas possible de choisir avec certitude compte tenu de la précision sur la détermination d'un coefficient d'emmagasinement par pompage d'essai.

#### 4.5 - RESULTATS DU CALAGE

Le calage a été réalisé avec les données BRUTES de Lille Ville prolongées par Lille Ville à partir de 1961.

Les principaux résultats du calage sont rassemblés dans les tableaux 2 et 3 et sur les figures 8 et 9.

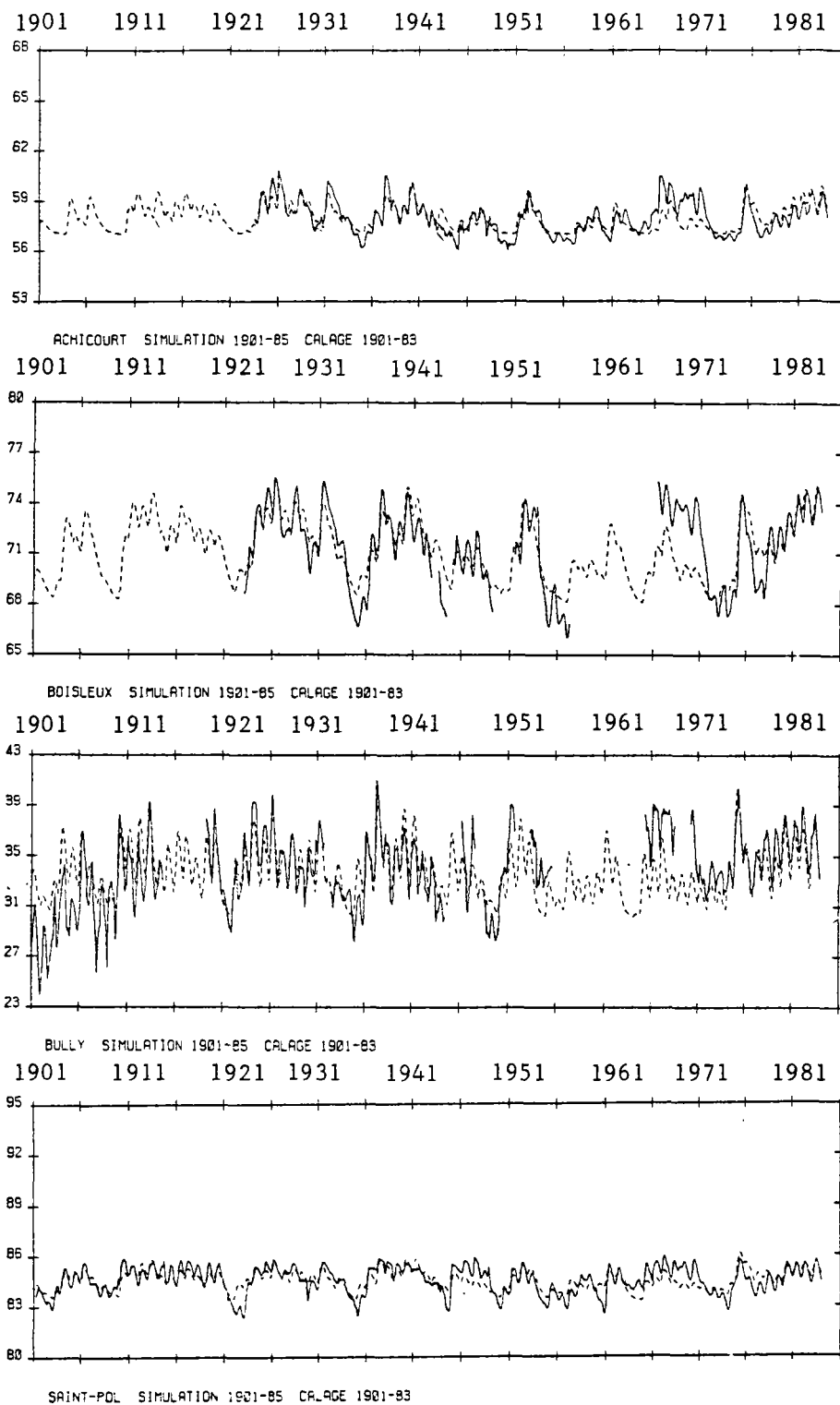
- \* Coefficients de corrélation : ils sont toujours supérieurs à 0.70 (ce qui est satisfaisant) sauf pour Baisieux ( $r = 0.64$ ) et Bully ( $r = 0.69$ ).
- \* Capacité de rétention du sol : elles sont comprises entre 106 et 179 mm pour 7 bassins sur 8 ce qui est très homogène.
- \* Temps de demi-percolation : ils sont compris entre 1.5 et 1.9 mois pour 5 bassins sur 8.
- \* Temps de demi-tarissement : ils sont compris entre 3 et 5 mois pour 6 bassins sur 8.
- \* Coefficient d'emmagasinement : ils sont compris entre 1.6 % et 4.4 % pour 6 bassins sur 8.
- \* Evapotranspiration réelle : elle est comprise entre 523 et 576 mm/an dans tous les cas ce qui traduit une forte homogénéité.
- \* Recharge moyenne : elle est comprise dans tous les cas entre 102 et 156 mm par an.

| Nom du piézomètre | Coefficient de corrélation entre observation et simulation | Capacité de rétention du sol (mm) | Temps de demi-percolation (mois) | Temps de demi-tarissement (mois) | Coefficient d'emmagasinement % | Niveau de base local |         | Nombre de mois observés |
|-------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------|-------------------------|
|                   |                                                            |                                   |                                  |                                  |                                | m NGF                | m prof. |                         |
| HELEMES           | 0.83                                                       | 147                               | 1.9                              | 3.6                              | 1.8                            | 13.8                 | (17.1)  | 803                     |
| BAISIEUX          | 0.64                                                       | 125                               | 0.56                             | 15.0                             | 7.8                            | 19.6                 | (8.1)   | 827                     |
| AUCHY             | 0.70                                                       | 117                               | 1.5                              | 6.5                              | 4.4                            | 19.6                 | (8.1)   | 850                     |
| TINCQUES          | 0.80                                                       | 179                               | 1.5                              | 4.3                              | 1.6                            | 99.8                 | (16.7)  | 895                     |
| ACHICOURT         | 0.78                                                       | 252                               | 1.7                              | 4.8                              | 5.6                            | 57.0                 | (5.6)   | 727                     |
| BOISLEUX          | 0.79                                                       | 179                               | 4.8                              | 4.6                              | 1.8                            | 68.0                 | (14.0)  | 579                     |
| BULLY             | 0.69                                                       | 106                               | 1.6                              | 3.3                              | 1.6                            | 30.1                 | (27.3)  | 752                     |
| SAINT POL         | 0.73                                                       | 107                               | 4.8                              | 3.3                              | 4.1                            | 83.2                 | (3.8)   | 994                     |

**Tableau 2 - Paramètres du calage sur la période 1901/1983**

| Nom du piézomètre | Ecart observé m | Type simulé m | Evapotranspiration réelle moyenne mm/an | Recharge moyenne mm/an |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------------|------------------------|
| HELEMES           | 2.1             | 1.8           | 54 6                                    | 132                    |
| BAISIEUX          | 1.8             | 1.1           | 534                                     | 143                    |
| AUCHY             | 1.7             | 1.2           | 530                                     | 149                    |
| TINCQUES          | 3.0             | 2.4           | 560                                     | 118                    |
| ACHICOURT         | 1.0             | 0.8           | 576                                     | 102                    |
| BOISLEUX          | 2.3             | 1.8           | 560                                     | 118                    |
| BULLY             | 2.9             | 2.0           | 523                                     | 156                    |
| SAINT POL         | 0.79            | 0.57          | 523                                     | 155                    |

**Tableau 3 - Caractéristique du calage sur la période 1901/1983**



**Figure 10 - Calage sur la période 1901-1985**  
**Achicourt, Boisieux, Bully, Saint Pol**

| Nom de piézomètre |   | Coefficient de corrélation | Capacité de rétention du sol (mm) | Temps de demi-percolation (mois) | Temps de demi-tarissement | Coefficient d'emmagasinement % | Niveau de base local m/NGF | Nombre de mois observés |
|-------------------|---|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| HELEMES           | 1 | 0.85                       | 135                               | 2.0                              | 5.1                       | 1.9                            | 12.2                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.78                       | 63                                | 2.2                              | 4.2                       | 2.6                            | 12.5                       | 111                     |
| BAISIEUX          | 1 | 0.76                       | 70                                | 0.84                             | 10.6                      | 9.9                            | 21.2                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.73                       | 53                                | 4.9                              | 14.3                      | 3.1                            | 13.0                       | 210                     |
| AUCHY             | 1 | 0.85                       | 109                               | 4.5                              | 4.5                       | 1.7                            | 17.7                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.90                       | 170                               | 2.8                              | 2.3                       | 1.7                            | 21.0                       | 175                     |
| TINCQUES          | 1 | 0.85                       | 105                               | 2.2                              | 4.4                       | 1.3                            | 97.3                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.88                       | 110                               | 2.5                              | 4.7                       | 1.3                            | 97.1                       | 179                     |
| ACHICOURT         | 1 | 0.88                       | 179                               | 2.4                              | 4.6                       | 3.8                            | 56.4                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.86                       | 217                               | 5.5                              | 3.7                       | 3.3                            | 56.6                       | 240                     |
| BOISEUX           | 1 | 0.88                       | 179                               | 4.8                              | 4.5                       | 1.2                            | 66.8                       | 232                     |
|                   | 2 | 0.93                       | 173                               | 6.0                              | 3.7                       | 1.8                            | 64.2                       | 125                     |
| BULLY             | 1 | 0.84                       | 144                               | 0.97                             | 4.4                       | 1.98                           | 30.0                       | 231                     |
|                   | 2 | 0.79                       | 157                               | 1.93                             | 3.5                       | 0.91                           | 30.3                       | 95                      |
| SAINT POL         | 1 | 0.85                       | 107                               | 4.8                              | 4.6                       | 4.6                            | 82.7                       | 240                     |
|                   | 2 | 0.69                       | 106                               | 4.8                              | 4.6                       | 4.3                            | 82.8                       | 240                     |

**Tableau 4 - Calages sur 20 années d'observation - Liste des paramètres**

- 1) Calage sur la période 1924/1943
- 2) Calage sur la période 1944/1963

## **5 - EXTENSION DE DONNEES**

### **5.1 - PRINCIPE DE L'EXTENSION DE DONNEES**

Trois calages ont été réalisés sur 3 périodes successives de 20 ans :

1924/1943 ; 1944/1963 ; 1964/1983

Les résultats de l'extension de données ont été contrôlés sur le reste de la période d'observations soit environ 50 à 60 ans suivant les piézomètres de façon à analyser l'efficacité de la méthode.

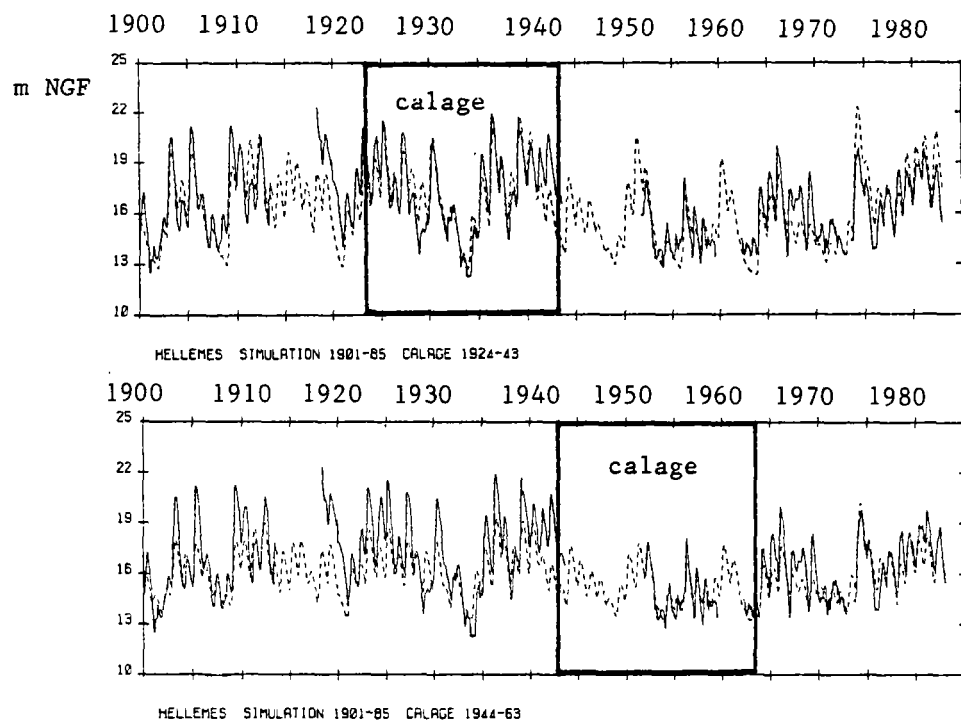
### **5.2 - RESULTATS DES CALAGES PARTIELS SUR 20 ANS D'OBSERVATIONS**

Seuls les calages réalisés sur les deux premières périodes de 20 ans sont présentés. Le calage réalisé sur la période 1964/1983 a en effet souvent donné des résultats peu satisfaisants qui pouvaient être prévu car cette période étaient moins bien simulée lors du calage sur la période totale : la période 1965-1971 étant généralement sous estimée par le modèle et la période 1975-1981 surestimée pour certains piézomètres (Baisieux, Auchy).

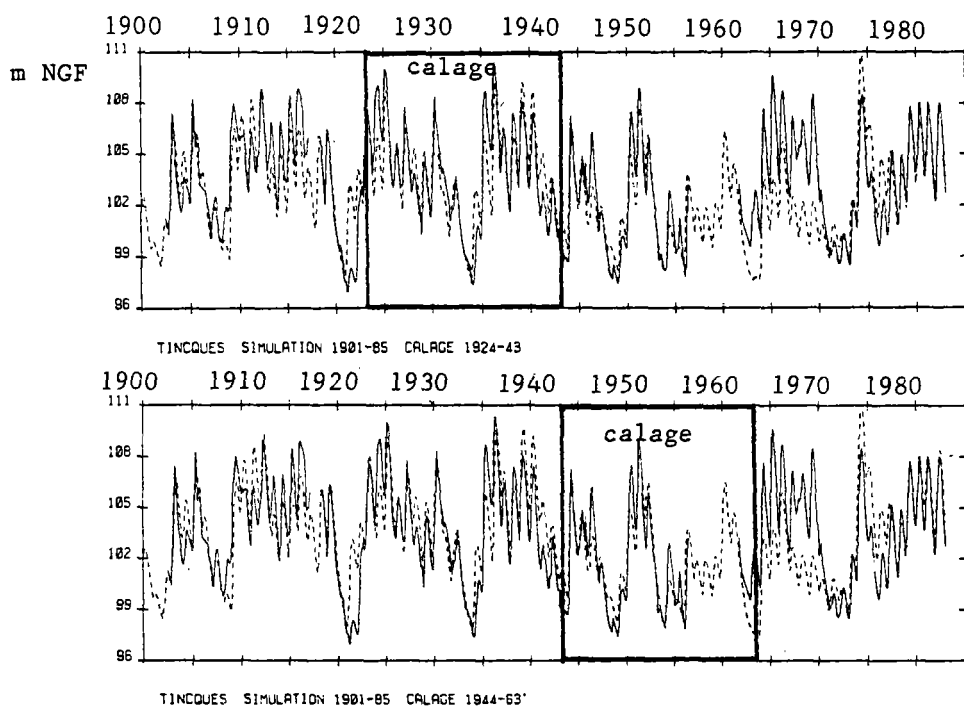
Les résultats des calages sur les 2 premières périodes de 20 ans sont présentés dans le tableau 4 ainsi que sur les figures 11 à 15 pour les 5 meilleurs résultats. Le tableau montre que les paramètres obtenus sont généralement comparables à ceux identifiés sur la période totale de calage. Les coefficients de corrélation sont généralement un peu supérieurs ce qui est logique. Les figures 11 à 15 montrent que les niveaux sont généralement bien simulés en dehors de la période de calage. Le paragraphe suivant va montrer comment apprécier l'efficacité de l'extension de données.

### **5.3 - EFFICACITE DE L'EXTENSION DE DONNEE**

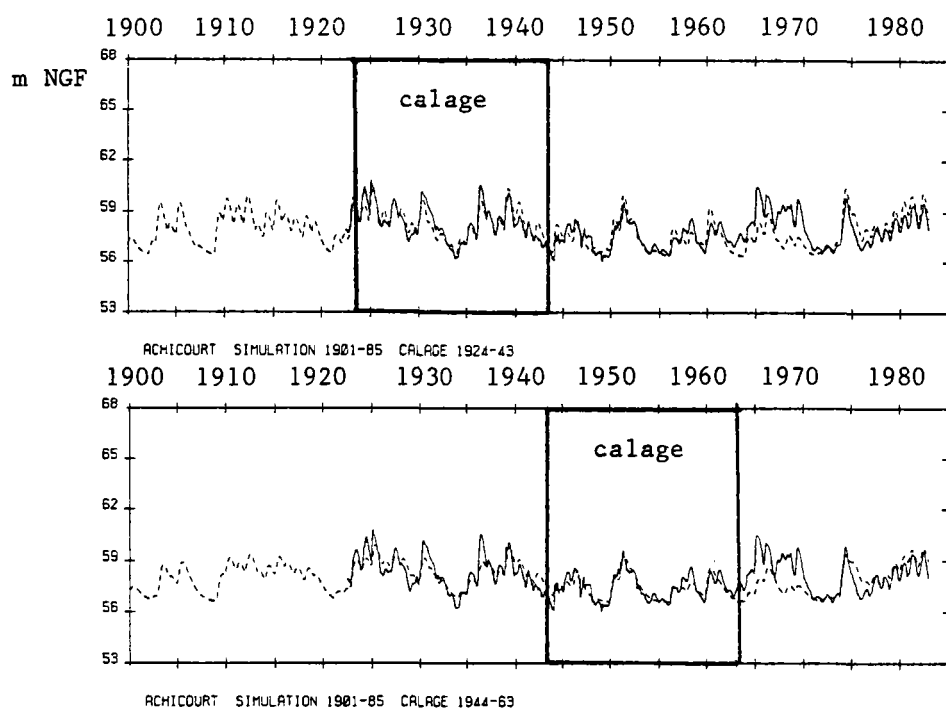
Un examen visuel permet d'apprécier l'efficacité de l'extension de données, cependant il est important de pouvoir disposer d'un critère objectif. On pourrait penser tout simplement au coefficient de corrélation entre niveaux observés et niveaux calculés en dehors de la période de calage. Un tel coefficient n'est pas adapté puisque le but du modèle n'est pas de calculer des niveaux en relation linéaire avec les niveaux observés, mais de calculer des niveaux égaux (ou le plus proche possible) des niveaux observés. Le critère sera donc relié à l'écart quadratique moyen se entre niveau observé



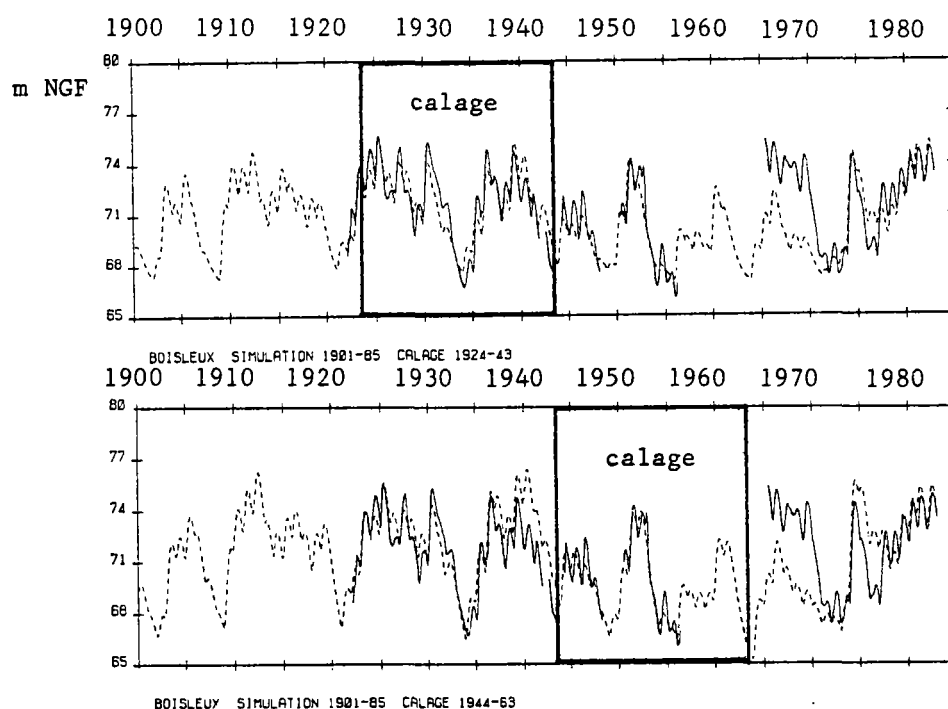
**Figure 11 - Prévision des niveaux à Helemmes**



**Figure 12 - Prévision des niveaux à Tincques**

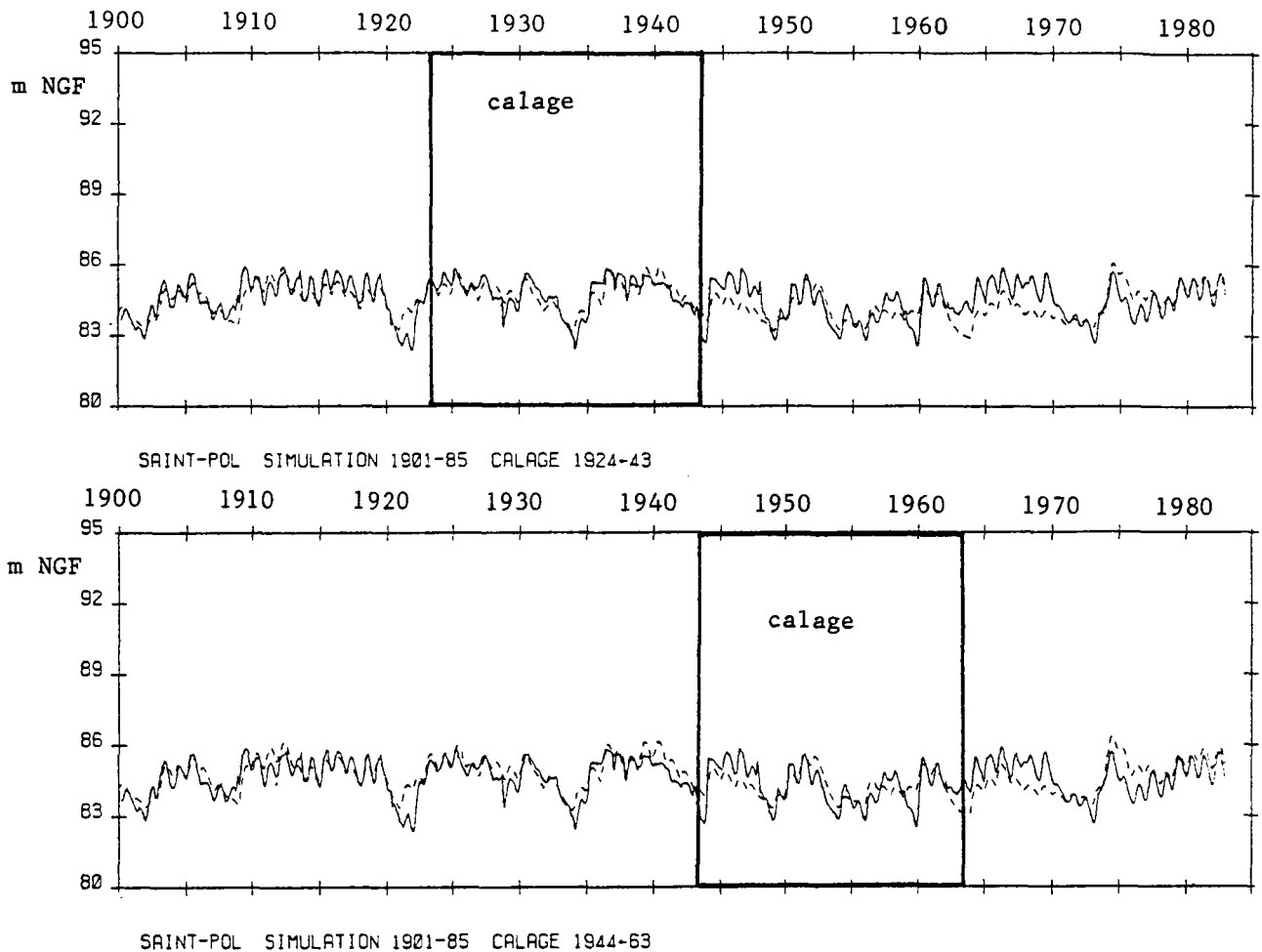


**Figure 13 - Prévision des niveaux à Achicourt**



**Figure 14 - Prévision des niveaux à Boisieux**





**Figure 15 - Prévision des niveaux à Saint Pol**

et niveau calculé. Pour obtenir un coefficient d'efficacité CE adimensionnel on pourrait penser à diviser la variance de l'erreur (le carré de l'écart quadratique moyen) par la variance des observations pendant la période de contrôle. En fait, quand on réalise l'extension de donnée cette variance est inconnue et en l'absence de modèle la meilleure extension qu'on pourrait réaliser serait un niveau toujours égal au niveau moyen  $H_{mc}$  calculé pendant la période de CALAGE. L'erreur commise serait caractérisée par  $E_o$ , l'écart quadratique moyen par rapport à  $H_{mc}$  des niveaux observés pendant la période de contrôle. Le critère d'efficacité - qui est celui utilisé par Nash et Sutcliffe (1970) - est la proportion dans laquelle cet écart est réduit :

On note :

$$se^2 = \text{écart quadratique moyen} = \text{moyenne} \left[ (H - H_{mc})^2 \right]$$

$H_{mc}$  = moyenne de  $H$  sur la période de calage

$$E_o^2 = \text{Moyenne (période de contrôle)} \left[ (H - H_{mc}) \right]^2$$

$CE^2$  = critère d'ajustement est défini par :

$$CE^2 = \frac{E_o^2 - s_e^2}{E_o^2} = 1 - s_e^2/E_o^2 = \text{pourcentage de variance expliquée}$$

Pour donner au coefficient d'ajustement CE la dimension d'un coefficient de corrélation on le définit comme la racine carrée du pourcentage de variance expliquée :

$$CE = \sqrt{1 - s_e^2/E_o^2}$$

Le tableau 5 donne pour les 8 piézomètres analysés les valeurs de l'écart-type de l'erreur se, de l'écart-type de la prévision Eo et du critère d'efficacité de prévision CE. Il apparaît que pour 5 des 8 piézomètres sélectionnés, ce critère est supérieur à 0,70. Ces piézomètres sont les suivants : Helemmes, Tincques, Achicourt, Boileux, Saint Pol.

Un 6ème piézomètre atteint un critère pratiquement aussi bon : Auchy avec un critère d'efficacité de 0.69 et 0.72 suivant la période de calage.

| Nom du piézométrique |   | Ecart-type de l'erreur (m) | Ecart-type des observations (Nash) (m) | Critère d'ajustement de Nash |
|----------------------|---|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Helemmes             | 1 | 1.38                       | 2.27                                   | 0.79                         |
|                      | 2 | 1.55                       | 2.97                                   | 0.85                         |
| Baisieux             | 1 | 1.94                       | 2.44                                   | 0.61                         |
|                      | 2 | 2.59                       | 1.85                                   | 0.00                         |
| Auchy                | 1 | 1.54                       | 2.21                                   | 0.72                         |
|                      | 2 | 1.55                       | 2.14                                   | 0.69                         |
| Tincques             | 1 | 1.99                       | 3.11                                   | 0.77                         |
|                      | 2 | 2.10                       | 3.62                                   | 0.83                         |
| Achicourt            | 1 | 0.79                       | 1.11                                   | 0.71                         |
|                      | 2 | 0.81                       | 1.32                                   | 0.79                         |
| Boisleux             | 1 | 1.83                       | 2.57                                   | 0.70                         |
|                      | 2 | 1.96                       | 2.91                                   | 0.74                         |
| Bully                | 1 | 2,48                       | 3,17                                   | 0.62                         |
|                      | 2 | 3,48                       | 2,99                                   | 0,00                         |
| Saint Pol            | 1 | 0.62                       | 0.87                                   | 0.70                         |
|                      | 2 | 0.57                       | 0.86                                   | 0.75                         |

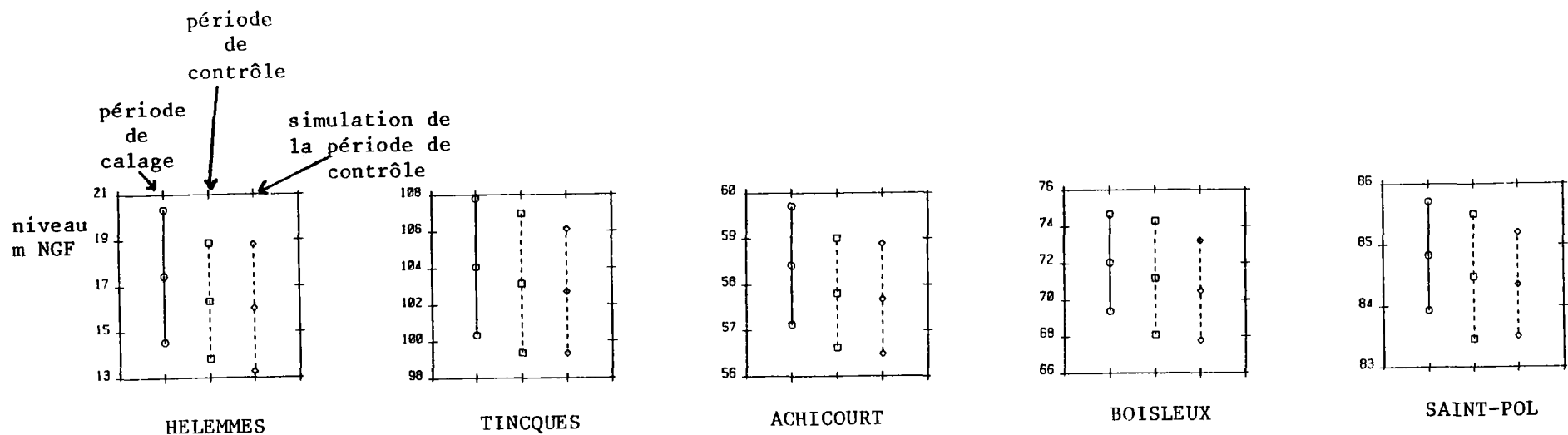
**Tableau 5 - Efficacité de la prévision**

1 - Calage sur la période 1924/1943

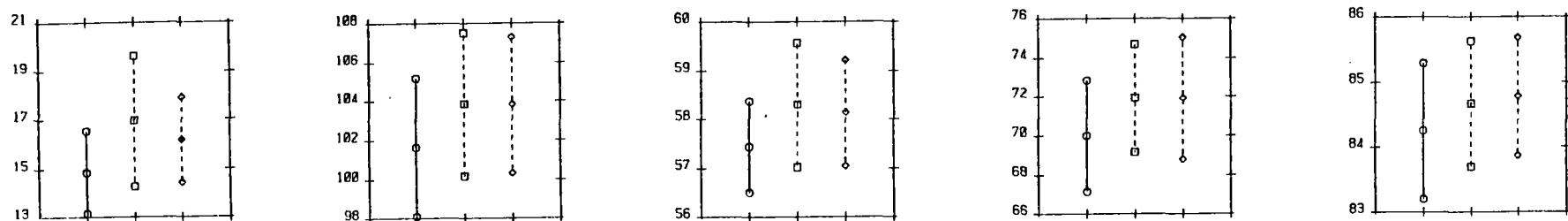
2 - Calage sur la période 1944/1963

On remarque que 5 piézomètres sur 8 permettent une prévision avec un critère de Nash supérieur à 0.70 pour les 2 périodes de calage.

Un 6ème piézomètre (Auchy) atteint un critère de 0.69.



a) Calage sur la période 1924-1943



b) Calage sur la période 1944-1963

Figure 16 - Prévision des niveaux après calage sur 20 années d'observation

Chaque bâton représente l'intervalle de variation à 80 % (niveau décennal sec, niveau médian, niveau décennal humide)

On voit que le modèle est performant puisqu'il parvient à reproduire l'amplitude de la période de contrôle : exemple Tincques : calage 1944/63 amplitude (98 à 105), période de contrôle (100,2 à 107,5), simulation (100,3 à 107,3)

La figure 16 présente sous forme graphique les caractéristiques statistiques observées et prévues avec le modèle pour les 5 piézomètres ayant donné les meilleurs résultats. Pour chaque piézomètre (et pour chaque période de calage) on donne successivement :

- a) l'intervalle de variation à 80 % observé sur la période de calage,
- b) l'intervalle observé sur la période de contrôle,
- c) l'intervalle calculé avec le modèle sur la période de contrôle.

L'intervalle de variation est défini comme le niveau moyen plus ou moins 1.28 écart-type puisque la répartition des niveaux est à peu près Gaussienne. Cette figure illustre bien l'intérêt du modèle ; par exemple sur la deuxième période de calage (1944/1963), les niveaux observés sont nettement plus bas que sur la période de contrôle : le modèle permet bien de retrouver le niveau moyen de la période de contrôle ainsi que son intervalle de variation à 80 %.

## CONCLUSION

Les niveaux de 8 piézomètres de la région Nord - Pas de Calais ont été modélisés pour analyser les possibilités d'extension de données avec un modèle hydrologique global pluie-niveau sur une très longue période. Il est apparu qu'il était difficile d'obtenir une très longue série de pluie parfaitement homogène pour réaliser une telle extension. La série de pluie **Lille Lesquin, Lille Ville** a cependant été utilisée et a permis un calage satisfaisant pour 6 piézomètres sur 8 pendant une période d'environ 80 ans. Ce calage était rendu difficile par des influences extérieures (pompages) qui apparaissaient nettement sur certains des piézomètres mais ne pouvaient être quantifiées. Après calage sur la période totale (pour réaliser une analyse de cohérence), trois calages partiels sur des périodes successives de 20 ans ont été réalisées. Les niveaux ont alors été étendus sur la période de contrôle constituée par les 60 ans restants. Les résultats sont satisfaisant puisque les critères d'efficacité de prévision de **Nash** et **Sutcliffe** sont supérieurs à 0.70 pour 5 piézomètres sur 8. Il a été montré que l'extension de données permet de prévoir correctement l'intervalle de variation des niveaux à 80 % sur une longue période. Il est en particulier possible de prévoir :

- . le niveau mensuel médian,
- . le niveau mensuel décennal sec,
- . le niveau mensule décennal humide.

Ce sont ces niveaux qu'il est important de pouvoir prédéterminer pour réaliser des aménagements de génie civil (et se protéger contre des niveaux trop élevés) ou de captage d'eau (et se protéger contre des niveaux trop bas).

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Martin (J), Thiery (D) 1986.-** Simulation des débits de la source de Saint Laurent (Seine Maritime) avec un modèle hydrologique global pluie-débit. Note technique EAU 86/15, juillet 1986
- Martin (J), Thiery (D) 1987.-** Analyse d'une longue série piézométrique au Burkina Faso. Extension de données par modèle hydrologique global. Note technique EAU 87/05, mars 1987
- Nash (JE), Sutcliffe (M) 1970.-** River Flow Forecasting Through conceptual Models, *Journal of Hydrology*, vol. 10, 1970
- Roche (P.A), Thiery (D.) 1984.-** Simulation globale de bassins hydrologiques - Introduction à la modélisation et description du modèle **GARDENIA** - Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU - novembre 1983
- Thiery (D.) 1985.-** Pourquoi un modèle à réservoir permet-il de simuler correctement le tarissement d'une nappe ou d'une source ? Note Technique EAU 85/23, octobre 1985
- Thiery (D.) 1987 ou 1988.-** Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model (Accepted for publication in the **Journal of Hydrology**)

**Annexe**

**PRINCIPE DU MODELE HYDROLOGIQUE GARDENIA**





## 1 - DOMAINES D'APPLICATION DU MODELE

Le modèle **GARDENIA** (modèle Global A Réservoirs pour la simulation Des Débits et des Niveaux Aquifères) est un modèle global qui permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) à partir de la séquence des précipitations sur son bassin d'alimentation, ou bien :
- le niveau en un point unique d'une nappe à partir également des précipitations.

Il est exploité de façon courante pour l'extension des données, tant dans l'espace que dans le temps :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calage préalable sur une période relativement courte ;
- étude des relations entre les paramètres du modèle et les facteurs physiographiques décrivant le bassin ;
- transposition à des bassins versants non jaugés.

Dans la pratique, il permet de dimensionner différents types d'ouvrages (digues, barrages) ou d'aménagements (champs de captage, micro-centrales électriques), d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, de réaliser des prévisions en temps réel, etc...

En effet, le modèle une fois calé est en mesure :

- de reconstituer pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, ou le niveau piézométrique d'une nappe à partir des pluies, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures ;
- de simuler au choix :
  - . des débits résultant de précipitations exceptionnelles (dimensionnement d'ouvrages de crues) ou de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrages) ;
  - . des niveaux piézométriques de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations possibles pour les mois futurs.

Il offre en plus la possibilité d'analyser d'une part les différents termes d'un cycle hydrologique (infiltration, évapo-transpiration, écoulement), d'autre part les différentes

composantes d'un écoulement (rapide, lent et très lent) dont il propose une décomposition (fig. 1).

Implanté sur l'ordinateur VAX du BRGM, il est adaptable, par son écriture en Fortran standard, à tout autre ordinateur de capacité suffisante, muni d'un compilateur de Fortran IV ou 77.

Le pas de temps des calculs peut être au choix, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel ; le choix du pas de temps mensuel permet en particulier de mettre le modèle à la portée de nombreuses études, par la facilité d'analyse et de critique des données et le faible coût du traitement informatique (économie de temps et de place en mémoire). Pour une étude plus fine, ou après un premier dégrossissage, on pourra utiliser un pas de temps plus fin (1 jour ou 5 jours par exemple).

Enfin, ce programme est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs cas, avec des options communes pour ces cas. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté pour les synthèses régionales où l'on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants.

## 2 - PARAMETRES DU MODELE

Le modèle **GARDENIA** fait intervenir un nombre maximal de 8 paramètres "hydrologiques" (capacité de réserves superficielles, temps de tarissement, coefficient sur les pluies...), et éventuellement 7 paramètres pour tenir compte de stocks neigeux.

Ces paramètres sont les suivants :

\* 6 paramètres dimensionnels caractéristiques des différents réservoirs du modèle :

|                      |                                                                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| . <b>RUMAX</b> (mm)  | Réserve superficielle maximale du réservoir RU,                                                            |
| . <b>THG</b> (mois)  | Temps de demi-montée du réservoir G1,                                                                      |
| . <b>RUIPER</b> (mm) | Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation, |
| . <b>TG1</b> (mois)  | Temps de demi-tarissement du réservoir G1,                                                                 |

- . **TG12 (\*)** (mois)      Temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2),
- . **TG2** (mois)            Temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent),

\* 2 coefficients correctifs destinés à prendre en compte, la non représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant :

- . **CORPL (%)**            Coefficient de correction des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées,
- . **CETP (%)**            Coefficient de corrections de l'évapo-transpiration potentielle, dont le but est similaire,

auxquels il faut éventuellement ajouter :

\* 7 paramètres caractéristiques pour simuler la gestion d'un stock de neige résultant de précipitations hivernales :

- . **GRADT (°C)**            Constante de correction de la température destinée à tenir compte d'un éventuel écart entre la température moyenne la mieux représentative du bassin versant et la température fournie au modèle à partir d'une pondération effectuée sur différentes observations faites aux stations météorologiques les plus proches,
- . **DENSIM (%)**            Pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux,
- . **EVNE (%)**            Coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques ; un stock de neige, s'il est suffisamment fourni, perd par sublimation un volume d'eau équivalent à :  $PN \times (1 + EVNE)/100$ , où PN représente l'ETP résiduelle non satisfaite par la pluie,

---

(\*) Dans le cas d'un réservoir souterrain G unique avec deux exutoires, TG12 est le seuil de séparation entre les deux exutoires (il est exprimé en mm).

**Nota :** Dans un calcul de niveau de nappe, s'il y a 2 composantes souterraines, le choix d'un réservoir unique G à deux exutoires est imposé.

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| . <b>FONP (%)</b>                | Pourcentage caractéristique de la fonte d'un stock neigeux, par une pluie PN à la température TEMP ; la quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut : $PN \times (1 + FONP/100) \times TEMP/80$ ,             |
| . <b>TFONT (°C)</b>              | Seuil de température en dessous duquel la neige ne fond plus (proche de 0°C),                                                                                                                                                   |
| . <b>DJOU</b><br>(mm/°C. jour)   | Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1°C au-dessus de TFONT (c'est le "degré-jour"), |
| . <b>FSOL</b><br>(1/10è mm/jour) | Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action des calories dégagées par le sol.                                            |

En outre, deux autres paramètres peuvent, sur option, être calculés par le modèle, à partir de l'équation de régression linéaire qui transforme :

- soit le niveau du réservoir souterrain du modèle en niveau piézométrique observé,
- soit la somme des vidanges des réservoirs du modèle en débit observé à l'exutoire.

Ces deux paramètres sont suivant le cas :

- le coefficient d'emmagasinement "équivalent" et le niveau de base local,
- ou la surface du bassin versant et un débit extérieur constant (ce débit extérieur constant étant le plus souvent imposé égal à zéro).

### 3 - LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

Les paramètres globaux qui caractérisent le modèle, ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées par un processus itératif à partir des valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs de sorties calculées par le modèle.

Pour ajuster le modèle, il faut disposer des données suivantes :

- une série de précipitations (pluies) (continue),
- une série d'évapotranspiration potentielle (ETP) (continue), qui peut être calculées à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air (et éventuellement d'humidité relative),
- une série continue de température de l'air (uniquement pour prendre en compte la fonte de la neige),
- une série (pas forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux en un piézomètre.

Ces 3 (ou 4) séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant les mesures de débit (pour faciliter l'initialisation du modèle).

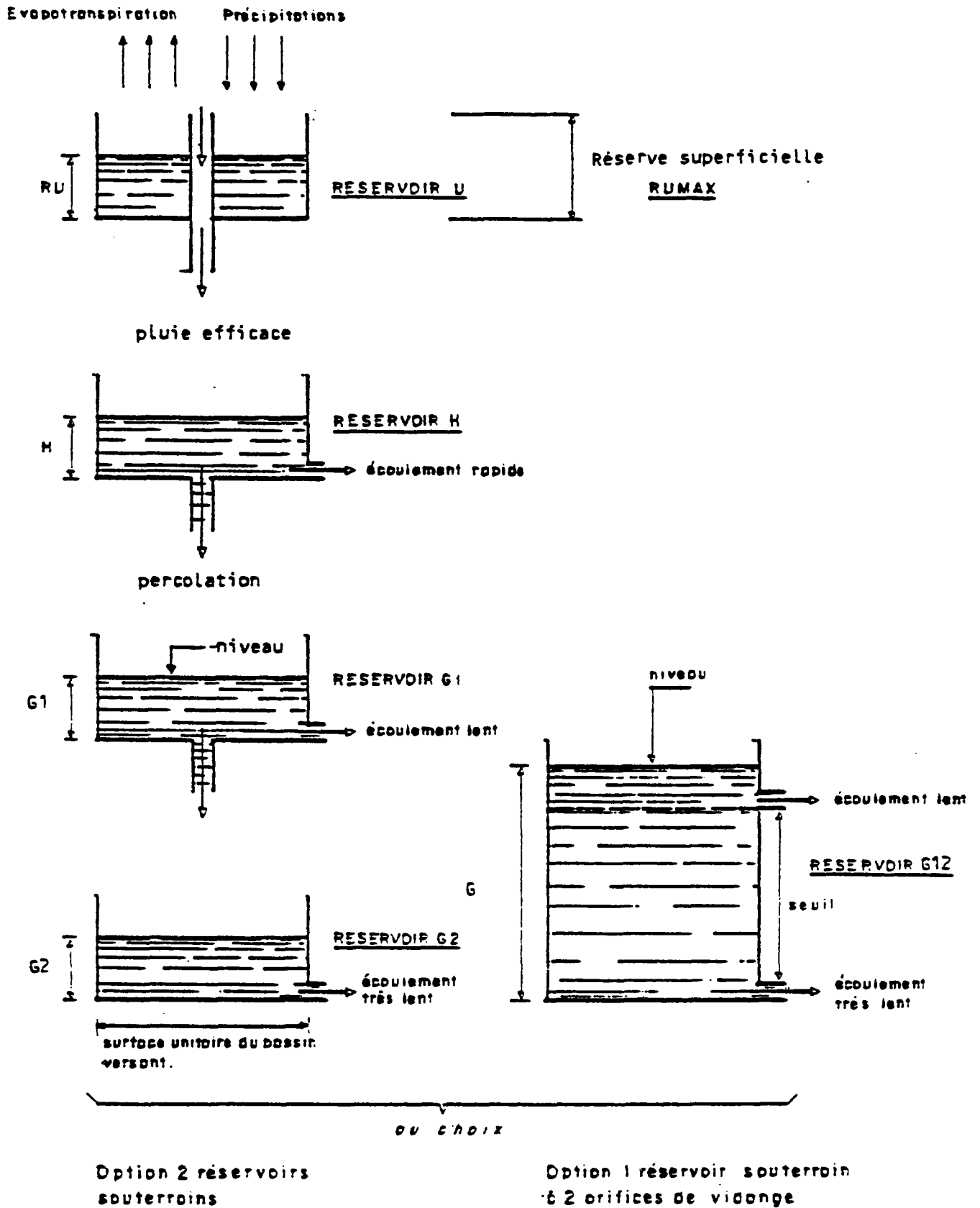


Figure A1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA



