

# Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994)

---

février 1996

R 38 975



Étude réalisée dans le cadre des  
actions de service public du BRGM

# Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994)

---

février 1996

R 38 975



Étude réalisée dans le cadre des  
actions de service public du BRGM

BRGM - Service Géologique National

Centre Thématique Eau  
1039, rue de Pinville - 34000 Montpellier  
Tél : 67.15.79.80

Mots clés : Précipitations efficaces, cartographie, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

DAUM J.R., DESPRATS J.F., DURAND F., (1996) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994). Rapport BRGM R 38 975, pp. 17, 4 annexes

© BRGM, 1995, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

# RESUME

On s'est proposé par la présente étude d'estimer les pluies efficaces moyennes annuelles en France sur la période de 1965 à 1994, en tenant compte de la variabilité de la réserve en eau du sol.

Après une comparaison des évapotranspirations potentielles (ETP) décennales calculées par les formules de Penman et de Turc sur 10 stations pendant la période de 1985 à 1994, il a été convenu d'utiliser les évapotranspirations potentielles calculées par la formule de Penman.

Les pluies et les ETP Penman décennales ont été acquises auprès de METEO FRANCE pour les 54 stations qui disposent de l'ETP sur la période considérée (1965-1994).

Les classes de réserve en eau du sol ont été déterminées à partir de la carte de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) établie en 1982 sous la direction de A. Mori. Pour chaque station trois valeurs ont été considérées (hypothèses minimale, moyenne et maximale).

Le calcul des pluies efficaces a été effectué au pas de temps décennal à l'aide du logiciel GARDENIA (BRGM).

Afin d'extrapoler les résultats des 54 stations à l'ensemble du territoire national, en tenant compte à la fois des précipitations moyennes annuelles et des variations de la réserve en eau du sol, un abaque a été établi à partir des pluies efficaces calculées (logiciel GARDENIA) pour quelques stations en faisant varier la réserve en eau du sol de 30 à 300 mm.

La lecture des cartes digitalisées des pluies moyennes annuelles (METEO FRANCE) et des réserves en eau du sol (INRA) et l'utilisation de l'abaque ont permis la cartographie des pluies efficaces sur tout le territoire national à partir d'un fichier de valeurs avec un maillage de 1 km<sup>2</sup>.

Trois cartes de pluies efficaces ont été dessinées correspondant aux hypothèses basse, moyenne et haute de valeurs de réserve en eau du sol.

Enfin les pluies efficaces moyennes ont été calculées à partir du fichier précédent pour les 55 bassins du Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE) et cartographiées à partir d'un fichier fourni par l'IFEN (Institut Français de l'Environnement).

Le travail cartographique a été réalisé à l'aide du logiciel SYNERGIS (BRGM).

## TABLE DES MATIERES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1. LE CONCEPT DE PLUIE EFFICACE.....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2. LES CALCULS DE PLUIE EFFICACE.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2.1. Présentation des méthodes de calcul de la pluie efficace.....</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>2.2. Présentation des méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle ....</b>                  | <b>4</b>  |
| <i>2.2.1. Mesures directes de l'ETP.....</i>  | <i>4</i>  |
| <i>2.2.2. Formules climatiques d'estimation de l'ETP.....</i>   | <i>4</i>  |
| <b>2.3. Comparaison de 2 méthodes de calcul de l'ETP : Turc et Penman.....</b>                            | <b>5</b>  |
| <i>2.3.1. Formule de Penman classique.....</i>  | <i>5</i>  |
| <i>2.3.2. Formule de Turc.....</i>  | <i>6</i>  |
| <i>2.3.3. Résultats de la comparaison.....</i>  | <i>6</i>  |
| <b>2.4. Calcul des précipitations efficaces au niveau de 54 stations<br/>        météorologiques.....</b> | <b>8</b>  |
| <b>3. UNE CARTOGRAPHIE NATIONALE DES PRECIPITATIONS<br/>EFFICACES .....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>3.1. Rappel des démarches précédentes .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>3.2. Proposition d'une nouvelle approche.....</b>  | <b>10</b> |
| <i>3.2.1. Les données utilisées.....</i>  | <i>10</i> |
| <i>3.2.2. Elaboration et utilisation de l'abaque .....</i>  | <i>11</i> |
| <i>3.2.3. Distribution spatiale des précipitations efficaces .....</i>                                    | <i>14</i> |
| <b>CONCLUSION.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>  | <b>16</b> |

## **LISTE DES ANNEXES**

- ANNEXE 1 :** Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle de 1985 à 1994 sur 10 stations météorologiques
- ANNEXE 2 :** Calculs des précipitations efficaces moyennes annuelles sur 30 ans (1965-1994) pour 54 stations météorologiques
- ANNEXE 3 :** Cartes au 1/6 000 000 - Précipitations (Météo France)  
- Réserves en eau des sols (INRA)  
- Précipitations efficaces moyennes annuelles avec trois hypothèses de réserves en eau des sols (haute, moyenne, basse)
- ANNEXE 4 :** Tableau et carte des précipitations efficaces moyennes annuelle (hypothèse moyenne de réserve en eau des sols) sur les 55 bassins versants du RNDE

## **INTRODUCTION**

La Direction de l'Eau du Ministère de l'Environnement a confié au BRGM, dans le cadre de ses actions de Service Public, une étude portant sur l'influence des modifications anthropiques de la couverture du sol sur l'alimentation des nappes d'eau souterraine. Devant l'étendue du sujet et les difficultés de son approche, en particulier pour une cartographie du potentiel d'infiltration en France, le comité de pilotage s'est accordé à diviser l'étude en 2 parties :

- une cartographie des précipitations efficaces moyennes annuelle, permettant la révision de la carte de France au 1/1 500 000 élaborée par M. Louvrier et J. Margat [1983] ;
- une réflexion au sujet de l'influence sur l'alimentation des nappes d'eau souterraine des actions anthropiques au travers de quelques types d'utilisation des terrains accompagnée d'une synthèse bibliographique des aspects théoriques.

Ce rapport présente les résultats de la première partie de l'étude.

Dans une phase initiale, le principe d'évaluation de la pluie efficace ainsi que différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle sont rappelées afin de préciser l'approche choisie.

Ensuite, une cartographie à petite échelle est réalisée, qui tient compte de la distribution spatiale de la pluviosité et des réserves en eau utiles du sol. Trois cartes des précipitations efficaces moyennes annuelles, calculées sur une période de 30 ans (1965-1994), sont présentées en fonction de différentes hypothèses sur les valeurs de réserves utiles du sol.

## 1. LE CONCEPT DE PLUIE EFFICACE

La pluie efficace est une notion permettant d'identifier la fraction des précipitations météorologiques (parfois qualifiées de "totales" par opposition au premier terme) qui donne lieu à un apport d'eau à l'hydrosystème continental.

Cette alimentation de l'hydrosystème se traduit par un écoulement d'eau, appelé écoulement total et décomposable, pour une part, en un ruissellement de surface ou un ruissellement hypodermique au niveau du sol, et, pour l'autre part, en une infiltration dans le sous-sol en direction des nappes d'eau souterraine (figure 1). La répartition entre ces deux composantes de l'écoulement peut se déterminer localement, avec des méthodes et des mesures de terrain poussées. Son évaluation ne rentrera donc pas dans le cadre de cette étude.

L'autre fraction des précipitations - celle qui n'alimente donc pas l'hydrosystème continental mais retourne vers l'atmosphère - est constituée par l'évapotranspiration : mélange d'évaporation directe de l'eau et de transpiration foliaire de la végétation.

La détermination de ces deux fractions est le résultat d'un bilan hydrique effectué sur une durée définie par un modèle hydrologique global assimilant les évolutions entre ces différentes fractions à des variations de niveau dans des réservoirs.

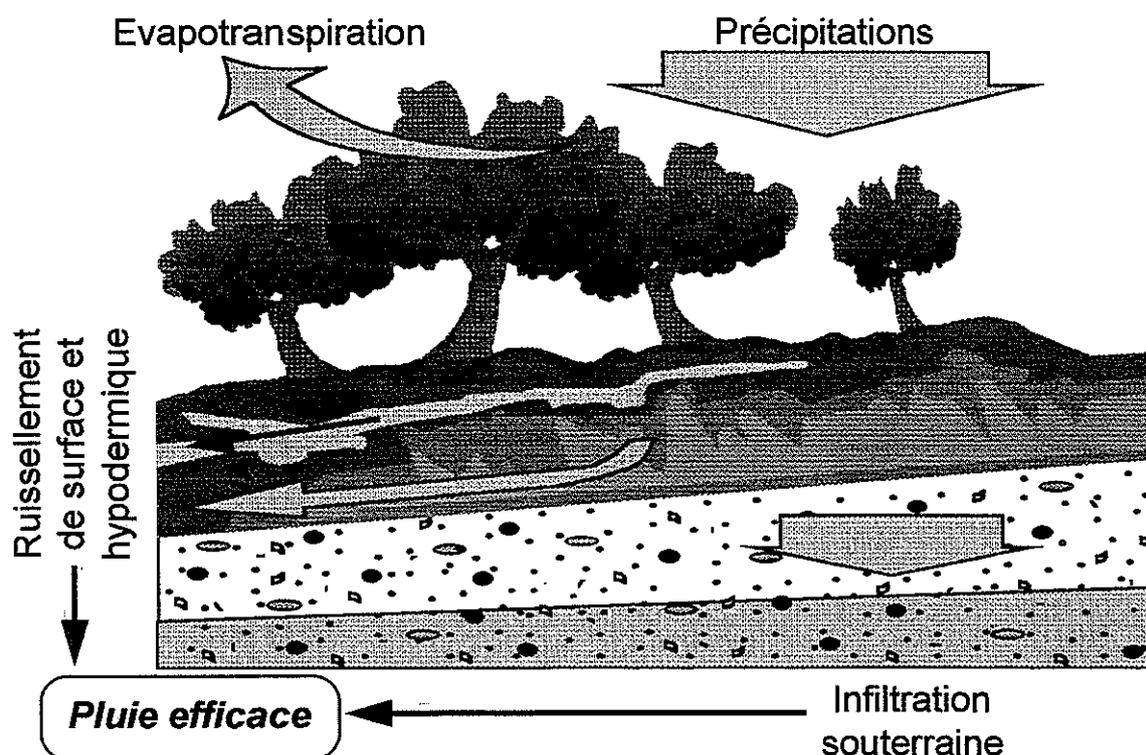


Figure 1 - représentation schématique du concept de pluie efficace.

## 2. LES CALCULS DE PLUIE EFFICACE

### 2.1. PRESENTATION DES METHODES DE CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

La pluie efficace (PEFF) est toujours le résultat d'un modèle global effectuant un bilan hydrique *a posteriori* de chroniques de précipitations (P) et d'évapotranspiration. Ce dernier paramètre étant difficilement mesurable de manière régulière et sur de longues périodes, on a recours, pour son estimation, à deux autres paramètres : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la réserve en eau maximale du sol ( $R_{\max}$ ). La méthode de calcul de la pluie efficace se compose alors de 4 étapes :

1. la détermination d'une chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP) correspondant, telle qu'elle a été définie à l'origine par Thornthwaite [1948], à la quantité d'eau maximale qu'un couvert végétal peut restituer à l'atmosphère. Dans la pratique, il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration (cf. § 2.2).
2. l'évaluation d'une réserve en eau maximale du sol ( $R_{\max}$ ) qui représente, dans ce modèle conceptuel, la capacité en eau d'un réservoir symbolisant l'ensemble sol-végétation. En ce sens, elle influe fortement sur l'évapotranspiration. Par commodité, cette réserve maximale est généralement assimilée à la réserve utile (RU), ou parfois réserve facilement utilisable (RFU), des sols définie par les agronomes. Cette réserve utile est égale à la quantité d'eau du sol extractible par les racines sur une profondeur utile, c'est-à-dire sur la profondeur atteinte par l'enracinement (généralement 1 m).
3. l'estimation de la chronique de l'évapotranspiration réelle (ETR) au moyen de la méthode des bilans enchaînés de Turc et Thornthwaite pour un pas de temps défini.
  - si  $P \geq ETP$  alors  $ETR = ETP$
  - si  $P < ETP$  alors  $ETR = P + \Delta RU$ , si  $P + \Delta RU \leq ETP$   
et  $ETR = ETP$ , si  $P + \Delta RU > ETP$   
avec  $0 \leq RU \leq R_{\max}$
4. le bilan hydrique nous conduit finalement à la valeur de la pluie efficace pour chaque pas de temps du calcul :
  - si  $P \geq ETP$  et si  $RU = R_{\max}$  alors  $PEFF = P - ETR$
  - si  $P \geq ETP$  et si  $RU < R_{\max}$  alors  $PEFF = P - ETR - (R_{\max} - RU)$   
(recharge de la réserve utile)
  - si  $P < ETP$  alors  $PEFF = 0$

L'ensemble de cette procédure de calcul est couramment utilisé et les étapes 2, 3 et 4 sont mises en oeuvre de manière semblable par la majorité des utilisateurs. Seule l'étape 1 fait l'objet de nombreuses variantes selon la méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle retenue.

## 2.2. PRESENTATION DES METHODES DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Il existe deux grandes familles de méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle : les méthodes par mesure directe d'une part, et les formules d'estimation d'autre part.

### 2.2.1. Mesures directes de l'ETP

Ces mesures de la quantité d'eau maximale restituée par la végétation à l'atmosphère nécessite une harmonisation de ce que l'on considère comme étant "la végétation". En effet, l'évapotranspiration des plantes varie en fonction des espèces, de leur culture, de la fréquence d'irrigation, de la hauteur de coupe, de leur fertilisation, de l'espace environnant, mais aussi des instruments de mesure et des paramètres climatiques. Actuellement, on s'accorde à opérer sur un gazon couvrant, en phase active de croissance, sans restriction dans son alimentation en eau et situé au sein d'une parcelle suffisamment étendue.

On distingue essentiellement les approches par bilan hydrique au moyen de lysimètres, des mesures de flux de vapeur d'eau au-dessus de la surface évaporante.

Ces méthodes d'évaluation de l'ETP correspondent plutôt à des campagnes de détermination expérimentale, peu pratiques et coûteuses, qui ne sont pas utilisables pour la fourniture de nombreuses données de référence. Elles peuvent par contre être appliquées au calibrage des formules d'estimation de l'ETP à partir de paramètres climatiques.

### 2.2.2. Formules climatiques d'estimation de l'ETP

La recherche de méthodes simples et appliquées de détermination de l'ETP a d'abord engendré la mise au point de nombreuses formules empiriques basées soit sur les températures (par exemple, Thomthwaite [1948], ou Hargreaves [1974 et 1985]), soit sur le rayonnement solaire, ou encore les deux (par exemple, Turc [1961]).

Par ailleurs, la tendance s'est aussi portée vers des méthodes dont le champ d'application est beaucoup plus large et fondées sur des approches physiques des phénomènes.

La principale de ces méthodes est celle de Penman [1948] qui a subi ensuite de nombreuses modifications et adaptations dans le but, soit de la simplifier, soit de se rapprocher encore plus de la réalité physique des phénomènes naturels : c'est notamment le cas pour la formule de Penman-Monteith [Monteith, 1965].

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. La Commission Internationale pour l'Irrigation et le Drainage (ICID) ainsi que l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations-Unies (FAO) considèrent la méthode de Penman-Monteith comme une référence mondiale dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle à partir de paramètres climatiques et pour le calibrage des autres méthodes de calculs [Allen *et al.*, 1994a et b]. Toutefois, cette méthode nécessite plusieurs données climatiques, en particulier la résistance minimale du couvert végétal à l'évapotranspiration, qui ne sont pas aisément disponibles et empêchent son utilisation à une échelle régionale ou plus vaste. Pour cette raison, cette formule n'a pas été retenue en vue de la cartographie de la pluie efficace.

Par ailleurs, le Centre Commun de Recherche de la Commission des Communautés Européennes a effectué une comparaison entre 3 formules sophistiquées et 9 formules simplifiées en différentes régions européennes où des séries de mesures d'évapotranspiration maximale étaient disponibles [Choisnel *et al.*, 1992]. Il en ressort que la formule classique de Penman reste la mieux adaptée aux différentes régions des pays d'Europe, dans le sens où c'est elle qui minimise le plus les écarts entre les valeurs estimées et celles mesurées, au pas de temps décadaire. La formule simplifiée de Hargreaves [1994] a aussi été retenue comme étant le meilleur compromis entre la qualité des estimations et la complexité des informations nécessaires aux calculs.

## 2.3. COMPARAISON DE 2 METHODES DE CALCUL DE L'ETP : TURC ET PENMAN

Pour le calcul de pluie efficace, objet de cette étude, deux formules d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle à partir de paramètres climatiques ont été présélectionnées :

- la formule classique de Penman, choisie d'après les résultats de la comparaison effectuée par le Centre Commun de Recherche de la CCE et aussi parce qu'elle est la formule couramment adoptée en France (en particulier par Météo France qui fournit directement les valeurs calculées pour certaines stations météorologiques) ;
- la formule empirique de Turc, qui est aussi souvent utilisée en France et se prête bien à un zonage climatique dans le but de construire une carte de pluie efficace. En première approximation, elle donne des résultats voisins de la formule de Penman [Delarozière-Bouillin, 1971].

### 2.3.1. Formule de Penman classique

L'approche initiale de Penman a conduit à l'expression :

$$ETP = \frac{\frac{R_n \Delta}{L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{en mm.j}^{-1})$$

\*  $R_n$  représente le rayonnement net, évalué d'après la formule :

$$R_n = (1 - A) R_g + (R_A - R_T)$$

avec  $A$  = albédo (généralement  $A = 0,2$  pour un couvert végétal)  
 $R_g$  = rayonnement solaire global  
 $R_A$  = rayonnement atmosphérique  
 $R_T$  = rayonnement terrestre

Ces trois valeurs de rayonnement n'étant jamais mesurées en routine, elles sont estimées à partir d'ajustements statistiques :

$$R_g = R_{go} \left( a + b \cdot \frac{DI}{DJ} \right) \quad \text{et} \quad (R_A - R_T) = \sigma T^4 (c - d \sqrt{e})(f - g \cdot \frac{DI}{DJ})$$

Rgo est le rayonnement solaire extraterrestre ] calculés par des formules  
 DJ est la durée du jour ] astronomiques  
 DI est la durée d'insolation ] mesurée à l'héliographe  
 $\sigma$  est la constante de Boltzmann ( $4,9 \cdot 10^{-8} \text{ J.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$ )  
 T est la température de l'air  
 e est la tension réelle de vapeur d'eau  
 a, b, c, d, f, g sont les coefficients d'ajustement statistique\*

\* L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau :

sa valeur est généralement estimée à  $2,47 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

\*  $\gamma$  est la constante psychométrique ( $0,65 \text{ hPa} \cdot \text{°K}^{-1}$ )

\*  $\Delta$  est la pente de la tangente de la courbe de tension de vapeur saturante en fonction de la température T (en °K) :

$$\Delta = E(T + 0,5) - E(T - 0,5)$$

où  $E(T) = 6,107(1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{T-273}{3} \right)^{8,827})$

\* Ea est le pouvoir évaporant de l'air :

$$Ea = 0,26 (E(T) - ed) \cdot f(u)$$

avec  $(E(T) - ed) = \text{déficit de saturation de l'air}$   
 $f(u) = \text{fonction de vent ajustée}$

### 2.3.2. Formule de Turc

L'expression proposée fait simplement intervenir la température de l'air, le rayonnement solaire et l'humidité relative de l'air si celle-ci est inférieure à 50 % :

$$ETP = 0,013 \cdot \frac{T}{T+15} \cdot (Rg + 50) \cdot \text{CORREC} \quad (\text{en mm.j}^{-1})$$

\* T est la température (°C)

\* Rg est le rayonnement solaire global (cf. supra avec les coefficients a et b fixés) :

$$Rg = Rgo \left( 0,18 + 0,62 \frac{DI}{DJ} \right)$$

\* CORREC est un facteur variable :  $\text{CORREC} = 1$  si l'humidité relative HR  $\geq 50 \%$

$$\text{CORREC} = 1 + \frac{50 - \text{HR}}{70} \text{ si HR} < 50 \%$$

### 2.3.3. Résultats de la comparaison

La comparaison des formules de Turc et de Penman a été effectuée sur une période de 10 ans (1985-1994) au pas de temps décadaire, pour 10 stations météorologiques réparties dans toute la France (Annexe 1).

A partir de données décadaires de température moyenne et de durée d'insolation fournies par Météo-France, et avec les valeurs de durée astronomique du jour et du rayonnement solaire extraterrestre calculées par des formules et des paramètres astronomiques, nous avons calculé la valeur de l'ETP Turc pour chaque décade de la période 1985-1994.

Les valeurs de l'ETP Penman décadaire pour cette même période sont fournies directement par Météo-France.

Deux critères de comparaison ont été utilisés :

- l'écart moyen entre les deux séries de valeurs :

$$\sum_1^n \frac{(ETP_{Penman} - ETP_{Turc})}{n}$$

- l'écart moyen absolu entre les deux séries de valeurs :

$$\sum_1^n \frac{|ETP_{Penman} - ETP_{Turc}|}{n}$$

Le tableau 1 présente les principaux résultats de cette comparaison.

On observe, tout d'abord, que l'écart moyen entre les deux séries est relativement faible ce qui confirme le fort voisinage des résultats des deux méthodes. Seule la station de Millau présente une ETP Penman sensiblement supérieure à l'ETP Turc, en particulier pour les fortes valeurs d'ETP.

Dans l'ensemble, il est intéressant aussi de constater que l'ETP Penman est légèrement supérieure à l'ETP Turc pour les stations du nord de la France (écart moyen positif) et inversement pour les stations du sud (écart moyen négatif).

Les écarts moyens absolus nous renseignent sur les incertitudes de valeurs entre les deux méthodes de calcul. En moyenne, les résultats de calcul des formules de Turc et de Penman décadaire diffèrent de plus ou moins 3 mm, ce qui représente une incertitude d'environ 10 % de part et d'autre d'une des deux valeurs.

Finalement, les deux méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration donnant des résultats très proches les uns des autres, il a été décidé d'utiliser la méthode de Penman, dont les valeurs décadaires sont directement fournies par Météo-France.

*Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994)*

Le choix du pas de temps du calcul s'est porté vers la décade. En effet, dans la pratique, l'ETP Penman est calculée au pas de temps journalier et les valeurs décadaires ou mensuelles proposées ne correspondent qu'à une somme de valeurs journalières. Par ailleurs, dans le cas de l'ETP Turc, des études antérieures ont montré que plus le pas de temps des calculs est fin, plus la valeur de pluie efficace est élevée [Coudrain et Thiéry, 1978].

Le pas de temps décadaire semble ainsi être le meilleurs compromis entre la recherche d'une précision dans l'estimation de l'ETP et de la pluie efficace et la durée des calculs sur de longues périodes.

| Nom de la station<br>météorologique | ETP Turc décadaire (mm)   |         |         | Ecart moyen | Ecart moyen<br>absolu |
|-------------------------------------|---------------------------|---------|---------|-------------|-----------------------|
|                                     | ETP Penman décadaire (mm) |         |         |             |                       |
|                                     | minimum                   | maximum | moyenne |             |                       |
| Ajaccio                             | 3,75                      | 65,47   | 29,61   | -1,04       | 2,94                  |
|                                     | 2,8                       | 69,9    | 28,82   |             |                       |
| Alençon                             | 0                         | 57,28   | 17,91   | 1,17        | 2,54                  |
|                                     | 0                         | 62,3    | 19,03   |             |                       |
| Carpentras                          | 0                         | 66,41   | 28,38   | 0,25        | 3,35                  |
|                                     | 2,2                       | 74,1    | 28,63   |             |                       |
| Châteauroux                         | 0                         | 57,23   | 20,49   | 2,12        | 3,32                  |
|                                     | 0                         | 66,6    | 22,61   |             |                       |
| Langres                             | 0                         | 58,26   | 17,86   | 2,57        | 3,51                  |
|                                     | 0                         | 65,6    | 20,42   |             |                       |
| Millau                              | 0                         | 58,17   | 21,85   | 4,41        | 5,08                  |
|                                     | 1,3                       | 75,9    | 26,17   |             |                       |
| Mont-de-Marsan                      | 0                         | 53,38   | 22,34   | -0,15       | 2,77                  |
|                                     | 0,9                       | 58      | 22,19   |             |                       |
| St-Girons                           | 0                         | 51,25   | 21,14   | -0,51       | 2,41                  |
|                                     | 1,6                       | 53,1    | 20,63   |             |                       |
| St-Quentin                          | 0                         | 53,47   | 16,97   | 1,57        | 2,63                  |
|                                     | 0                         | 59,2    | 18,54   |             |                       |
| Vichy                               | 0                         | 56,64   | 20,44   | 0,57        | 2,33                  |
|                                     | 0                         | 60,6    | 21,01   |             |                       |

**Tableau 1** - comparaison de l'ETP Turc et de l'ETP Penman sur une période de 10 ans (1985 - 1994) pour 10 stations météorologiques.

## **2.4. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES AU NIVEAU DE 54 STATIONS METEOROLOGIQUES**

Les valeurs moyennes annuelles de précipitations efficaces sont calculées sur une période de 30 ans afin de leur donner une meilleure représentativité inter annuelle. Sur la période 1965-1994, les valeurs décennales de l'évapotranspiration potentielle (méthode Penman) et de précipitations sont fournies par Météo-France pour 54 stations météorologiques en France.

Les valeurs d'évapotranspiration réelle puis de précipitations efficaces sont alors calculées par le modèle GARDENIA [Boisson et Thiéry, 1991]. Il s'agit d'un modèle hydrologique global à réservoirs superposés qui permet de choisir le pas de temps des données entrées et des résultats fournis.

Trois valeurs de précipitations efficaces moyennes annuelles sont calculées pour chaque station (Annexe 2). Elles correspondent à trois hypothèses (haute, moyenne ou basse) sur la valeur de la réserve maximale en eau des sols au droit des stations météorologiques. Ces hypothèses sont issues de l'interprétation de la carte au 1/2 000 000 de l'INRA sur les réserves en eau utiles des sols [Mori, 1982], lesquelles sont assimilées aux réserves maximales.

La gamme des précipitations efficaces moyennes annuelles calculées aux stations météorologiques s'étend de 33 mm/an (Clermont-Ferrand) à 803 mm/an (Biarritz) dans le cas de l'hypothèse moyenne sur les valeurs de RU. Elle varie de 18 mm/an à 764 mm/an avec l'hypothèse haute et de 61 mm/an à 866 mm/an avec l'hypothèse basse.

Géographiquement, les stations où les précipitations efficaces moyennes annuelles sont les plus faibles se situent au centre du bassin parisien (Reims, Le-Bourget, Chartres, Beauvais) et dans les dépressions à climat continental (Clermont-Ferrand, Colmar, Strasbourg). Celles où les précipitations efficaces moyennes annuelles sont les plus fortes se trouvent au niveau des reliefs à proximité de l'océan Atlantique (Biarritz, Brest) où plus à l'intérieur des terres (Besançon, Ambérieu, Pau, Tarbes).

### **3. UNE CARTOGRAPHIE NATIONALE DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES**

#### **3.1. RAPPEL DES DEMARCHES PRECEDENTES**

La distribution spatiale des précipitations efficaces moyennes annuelles a déjà fait l'objet de nombreux essais de cartographie. Les uns sont à l'échelle d'une région ou de bassins versants hydrographiques, d'autres concernent des périodes de temps relativement courtes. Certains enfin sont à l'échelle du territoire national et sur des périodes suffisamment longues pour donner une signification aux valeurs moyennes inter annuelles. Dans ce dernier cas, le nombre de stations où l'évaluation des précipitations efficaces était possible restait relativement réduit.

Une des démarches les plus approfondies a été réalisée par M. Louvrier et J. Margat [1983]. Elle a abouti sur une carte au 1/1 500 000 des précipitations efficaces moyennes annuelles en France calculée à partir des données de 142 stations sur une période de référence trentenaire (1946-1976) au pas de temps décennaire. La distribution spatiale des valeurs de précipitations efficaces a été "interpolée" manuellement à partir des 142 stations en "s'appuyant" sur le modelé des isohyètes d'une carte des précipitations moyennes annuelles. Par ailleurs, une valeur uniforme de réserve maximale en eau des sols a été employée sur l'ensemble du territoire national. Elle était égale à 100 mm. C'est ce dernier point que nous avons essayé d'améliorer.

#### **3.2. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE APPROCHE**

Une approche classique consisterait en une interpolation de valeurs de pluies efficaces calculées au niveau de stations météorologiques. Dans notre cas, le nombre de stations disponibles (54) est largement insuffisant pour obtenir une bonne représentativité de la distribution spatiale des pluies efficaces. Cette approche n'a donc pas été utilisée.

Le principe de la démarche adoptée consiste alors à transformer deux cartes de données de base (pluie totale et réserve utile) en une représentation par un maillage de valeurs, puis à calculer pour chacun des noeuds du maillage une valeur moyenne de la pluie efficace annuelle estimée en fonction d'un abaque approprié.

##### **3.2.1. Les données utilisées**

La première des cartes de base concerne la pluie totale (Annexe 3). Il s'agit de la deuxième édition de la carte des précipitations en France réalisée par Météo-France en 1988 à partir des données de 1 500 stations météorologiques du Réseau Climatologique d'Etat, moyennées sur la période 1951-1980. Cette carte intègre un facteur externe (en l'occurrence le relief) pour affiner la représentation des variations spatiales de la pluviosité grâce à la méthode d'interpolation AURELHY.

L'utilisation de cette carte permet donc indirectement de tenir compte du relief dans le calcul des précipitations efficaces moyennes annuelles. La période de référence (1951-1980) est aussi trentenaire comme pour la carte des précipitations efficaces (1965 - 1994) et le décalage entre les deux périodes de référence n'induit *a priori* pas de grosses modifications sur le résultat obtenu étant entendu qu'il s'agit d'une valeur moyenne inter annuelle de précipitation efficace calculée sur une période relativement longue et que les deux périodes de référence se chevauchent sur un peu plus de leur moitié.

Cette carte a fait l'objet d'une numérisation des courbes isohyètes, lesquelles ont ensuite été interpolées selon la méthode de courbure minimale (erreur résiduelle maximale fixée à 2 mm) pour obtenir par itérations des valeurs aux noeuds d'une grille dont les mailles ont 1 km de côté.

La deuxième carte est celle des réserves en eau utiles des sols dressée par l'INRA [Mori, 1982] (Annexe 3). Cette carte distingue 10 catégories de sols et exprime statistiquement la réserve utile estimée sur une profondeur maximale de 1 m.

Ces catégories ont alors été interprétées en terme de réserves maximales en eau des sols et huit classes ont été différenciées, avec, pour chacune d'elles, trois valeurs possibles : maximale, moyenne et minimale (tableau 2). La carte a alors fait l'objet d'un "échantillonnage" des zones de réserve utile identique selon les noeuds d'une grille dont les mailles ont 1 km de côté.

| Catégories de sols et de réserves en eau utiles                                | réserves en eau maximales hypothèse basse | réserves en eau maximales hypothèse moyenne | réserves en eau maximales hypothèse haute |
|--|---|---|---|
| RU > 200 mm sur la totalité de l'unité   | 200                                       | 250   | 300                                       |
| RU > 200 mm sur plus de la moitié de l'unité                                   | 150                                       | 200   | 250                                       |
| 70 < RU < 200 mm plus de la moitié de l'unité, RU > 200 mm sur le reste        | 100                                       | 150   | 200                                       |
| 70 < RU < 200 mm sur la totalité de l'unité                                    | 80  | 130   | 180                                       |
| 70 < RU < 200 mm plus de la moitié de l'unité, RU < 70 mm sur le reste         | 60  | 110   | 160                                       |
| RU < 70 mm sur plus de la moitié de l'unité                                    | 50  | 70  | 90  |
| RU < 70 mm sur la totalité de l'unité  | 30  | 50  | 70  |
| RU variable : sols de vallée à réserves influencée par la présence de la nappe | 50  | 100   | 150                                       |
| Sols d'altitude supérieure à 2 000 m   | 50  | 100   | 150                                       |
| Lacs, étangs, roches affleurantes et zones urbaines                            | 50  | 100   | 150                                       |

Tableau 2 - catégories de sols et de réserves en eau utiles ; interprétations en terme de réserves maximales en eau.

### 3.2.2. Elaboration et utilisation de l'abaque

Cet abaque a pour objectif de fournir une valeur moyenne de précipitation efficace en chaque noeud d'un maillage, à partir, d'une part, de la valeur de la réserve maximale en eau et, d'autre part, de la valeur de la pluviométrie totale en ce noeud.

Il a été construit à partir des valeurs calculées de pluie efficace pour les 54 stations météorologiques. Pour une valeur de précipitation donnée, c'est-à-dire pour une station donnée, différentes valeurs de précipitations efficaces ont été calculées en faisant varier la valeur de la réserve maximale en eau des sols. Pour les valeurs de précipitation non disponibles sur les stations retenues, les courbes ont été construites en fonction des courbes voisines.

L'abaque est présenté figure 2 et les valeurs retenues pour les calculs de précipitations efficaces figurent dans le tableau 3.

Un programme de calcul a ensuite été créé afin de lire les valeurs des deux grilles d'entrée (précipitations et réserves maximales) puis, en fonction des valeurs du tableau 3, de fournir une valeur moyenne de précipitation efficace. Trois cartes ont été ainsi élaborées selon les hypothèses haute, moyenne ou basse sur la valeur de la réserve maximale en eau (Annexe 3).

Il faut noter également que les valeurs, et donc les courbes de l'abaque, sont des valeurs de tendance moyenne car elles ne peuvent pas prendre en compte la répartition temporelle des précipitations, ni de l'ETP. Dans notre approche, deux points géographiquement distincts ayant les mêmes valeurs de précipitation et de réserve maximale en eau auront la même valeur de précipitation efficace moyenne. Cela n'est généralement pas le cas dans la réalité, mais cette approche permet d'observer l'influence des variations de la valeur de la réserve maximale en eau des sols sur les précipitations efficaces.

| Précipitations<br>totales (mm) | Valeurs de la réserve maximale en eau des sols (mm) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                | 30  | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 110  | 130  | 150  | 160  | 180  | 200  | 250  | 300  |
| 2400                           | 1700  | 1580 | 1550 | 1520 | 1480 | 1450 | 1410 | 1380 | 1340 | 1330 | 1320 | 1300 | 1280 | 1260 | 1240 |
| 2100                           | 1500  | 1380 | 1340 | 1320 | 1280 | 1240 | 1210 | 1190 | 1160 | 1140 | 1130 | 1110 | 1100 | 1080 | 1060 |
| 1900                           | 1300  | 1200 | 1170 | 1150 | 1140 | 1080 | 1060 | 1050 | 1020 | 1000 | 990  | 970  | 960  | 950  | 940  |
| 1700                           | 1140  | 1050 | 1030 | 1020 | 1000 | 960  | 940  | 930  | 900  | 880  | 870  | 860  | 850  | 830  | 820  |
| 1500                           | 1000  | 920  | 890  | 860  | 850  | 830  | 810  | 800  | 780  | 760  | 750  | 740  | 730  | 720  | 700  |
| 1300                           | 840   | 770  | 750  | 730  | 720  | 700  | 690  | 680  | 670  | 660  | 650  | 640  | 630  | 620  | 600  |
| 1160                           | 710   | 650  | 635  | 620  | 600  | 592  | 585  | 580  | 560  | 550  | 540  | 530  | 520  | 510  | 500  |
| 1008                           | 620   | 540  | 520  | 510  | 500  | 480  | 460  | 455  | 440  | 435  | 430  | 425  | 420  | 410  | 400  |
| 883                            | 520   | 450  | 440  | 420  | 410  | 395  | 370  | 360  | 350  | 340  | 335  | 330  | 325  | 320  | 315  |
| 763                            | 428   | 360  | 340  | 320  | 310  | 300  | 280  | 270  | 260  | 255  | 253  | 250  | 245  | 240  | 220  |
| 648                            | 330   | 260  | 240  | 230  | 215  | 190  | 170  | 165  | 160  | 155  | 150  | 145  | 140  | 130  | 120  |
| 538                            | 230   | 160  | 150  | 140  | 120  | 100  | 90   | 80   | 70   | 60   | 56   | 52   | 48   | 44   | 40   |
| 400                            | 200   | 130  | 100  | 90   | 80   | 60   | 50   | 40   | 35   | 30   | 28   | 26   | 24   | 22   | 20   |

**Tableau 3** - valeurs des précipitations efficaces moyennes annuelles en fonction des précipitations totales et de la réserve maximale en eau.

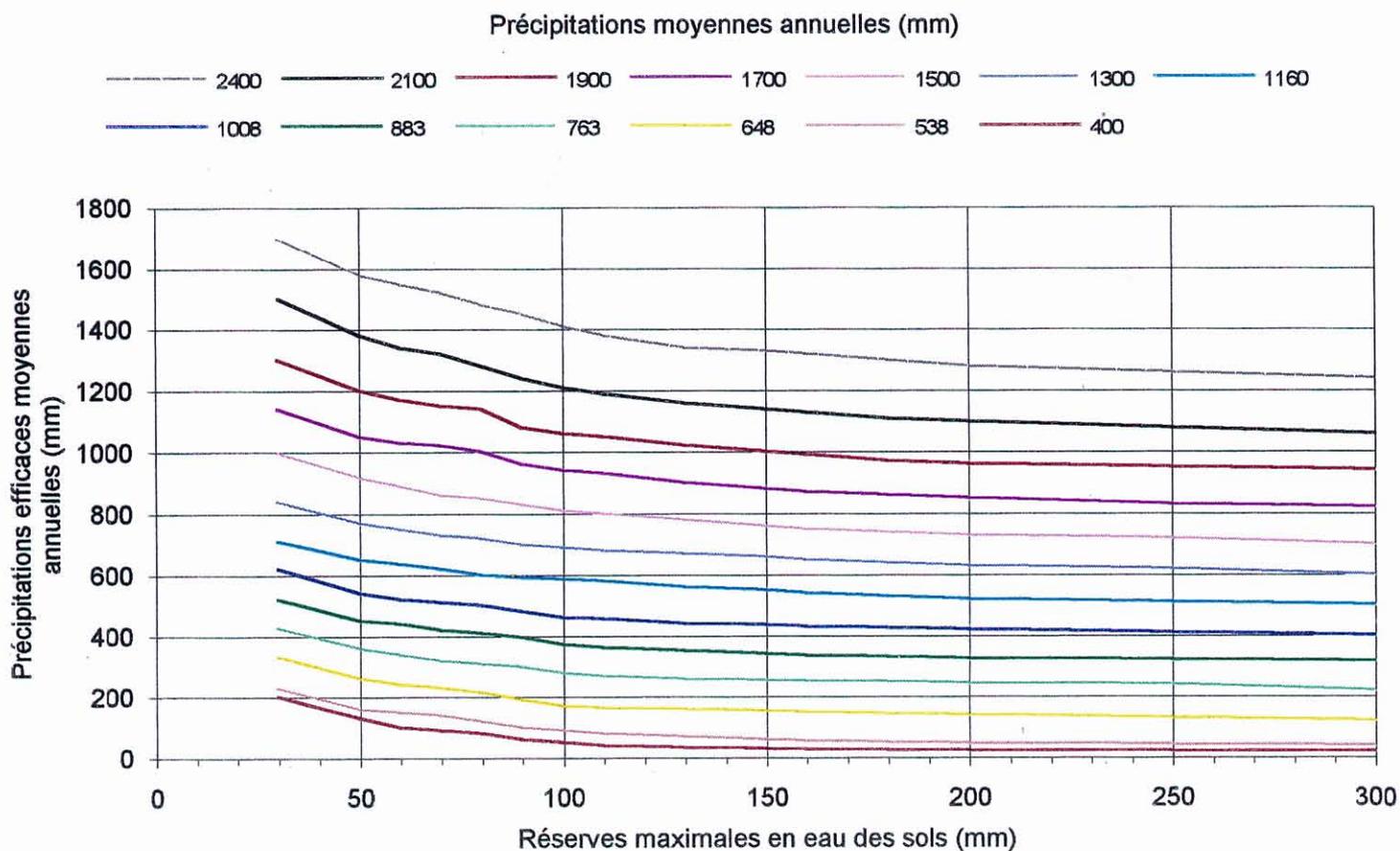


Figure 2 - abaques des précipitations efficaces moyennes annuelles en fonction des précipitations totales et de la réserve maximale en eau.

### **3.2.3. Distribution spatiale des précipitations efficaces**

En premier lieu, on peut constater que la répartition géographique des zones d'égales précipitations efficaces conserve les mêmes tendances, quelle que soit l'hypothèse sur la valeur de la réserve maximale en eau utilisée. On vérifie bien aussi que les précipitations efficaces varient en sens inverse de la valeur de la réserve maximale en eau.

La gamme des valeurs calculées pour les précipitations efficaces moyennes s'étend de 45 mm/an à 1441 mm/an, soit un rapport de 1 à 30 environ, pour une moyenne de l'ordre de 370 mm/an. L'apport d'eau global à l'hydrosystème du territoire français - cours d'eau et nappes souterraines - peut ainsi présenter des situations particulièrement contrastées.

Ainsi que l'analyse des valeurs calculées aux stations météorologiques le laissait entrevoir, les secteurs où les précipitations efficaces sont les plus élevées correspondent aux zones de reliefs jeunes ou anciens (Alpes, Pyrénées, Jura, Vosges, Cévennes, Massif central, Massif armoricain et Corse). Ces fortes valeurs des précipitations efficaces sont accentuées par la proximité de l'océan Atlantique (Pyrénées atlantiques et Massif armoricain occidental) ou de la mer Méditerranée (Alpes du sud, Cévennes - Montagne Noire et Corse).

A l'opposé, les secteurs où les précipitations efficaces sont faibles se situent au centre des bassins intérieurs du territoire français (essentiellement le Bassin parisien et le nord de l'Artois - Flandre, mais aussi la région de Toulouse), dans les dépressions à climat continental marqué (Alsace, Limagne, Forez et plus légèrement le nord de la vallée de la Moselle) et au niveau des grandes plaines du pourtour méditerranéen (Languedoc, Roussillon, sud de la vallée du Rhône et Durance, plaine orientale de la Corse).

A la demande de l'IFEN, un travail de planimétrie a été effectué sur la carte des précipitations efficaces moyennes annuelles correspondant à l'hypothèse moyenne sur les valeurs de la réserve maximale en eau. Sur 55 bassins versants du réseau national des données sur l'eau (RNDE), les valeurs minimales et maximales ainsi que la moyenne des précipitations efficaces ont été déterminées (annexe 4). Ces valeurs mériteraient à présent d'être comparées aux flux hydriques observés pendant la même période sur chacun de ces bassins afin d'apprécier la validité des précipitations efficaces comme index de l'écoulement moyen annuel d'eau alimentant l'hydrosystème.

## CONCLUSION

Cette étude de l'alimentation en eau de l'hydrosystème continental de France a comporté deux thèmes de développement des connaissances.

Tout d'abord, une comparaison entre deux formules d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle, Turc et Penman, a été effectuée sur une période de 10 ans (1985-1994) au pas de temps décennaire, pour 10 stations météorologiques réparties dans toute la France.

Elle montre que, dans l'ensemble, les formules de Penman et de Turc donnent des résultats très proches pour le territoire français. Il semblerait ainsi que l'ETP Penman soit légèrement supérieure à l'ETP Turc pour le Nord de la France et inversement pour le Sud. Pour le reste de l'étude, la formule d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle de Penman a été retenue.

Ensuite, l'essentiel de la réflexion a porté sur l'élaboration d'une méthode de cartographie des précipitations efficaces en France, qui prenne en compte la distribution spatiale des précipitations totales et de la réserve maximale en eau des sols.

Un abaque a été constitué à partir de valeurs calculées sur 54 stations météorologiques afin de fournir des hauteurs moyennes annuelles de précipitation efficace en tout point où les précipitations totales et la réserve maximale en eau des sols sont connues. Une carte des précipitations efficaces au 1/6 000 000 a alors été réalisée en utilisant les données issues des cartes de précipitations de Météo-France et de réserves utiles en eau des sols de l'INRA.

Cette carte montre les tendances principales suivantes. Les zones de forte alimentation de l'hydrosystème se situent au niveau des reliefs géographiques et plus particulièrement à proximité de l'Océan Atlantique ou de la Mer Méditerranée. A contrario, les secteurs où l'apport en eau à l'hydrosystème est faible se trouvent au centre des grands bassins et dans les domaines de plaine à climat continental ou méditerranéen marqué.

Une cartographie des précipitations efficaces réalisée en fonction uniquement de la distribution spatiale des précipitations totales aurait présenté des variations géographiques relativement douces et progressives, tendancielle. L'introduction d'un paramètre supplémentaire, la réserve maximale en eau des sols, a permis la mise en évidence de forts contrastes dans la répartition des précipitations efficaces. Il ne s'agit toutefois que d'une représentation plausible de cette répartition, en relative concordance avec les valeurs calculées au niveau des 54 stations météorologiques, et, en aucun cas, un outil pour évaluer régionalement les ressources en eau, ou dimensionner des projets d'aménagement.

La validation de cette carte passe maintenant, d'une part, par l'amélioration du calage de l'abaque, d'autre part, par la comparaison à des données d'écoulement superficiel et souterrain observé par bassin. Par ailleurs, il serait intéressant d'effectuer aussi une comparaison avec des valeurs de précipitations efficaces calculées au moyen d'une formule simplifiée d'estimation de l'ETP (Hargreaves par exemple) ; cette formule pouvant être employée sur un grand nombre de stations météorologiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S., (1994a) - An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, vol. 43, n° 2, p. 1-34.
- ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S., (1994b) - An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, vol. 43, n° 2, p. 35-63.
- BOISSON M., THIERY D., (1991) - Logiciel GARDENIA - Notice d'utilisation. Rapport BRGM R 32 209.
- CHOISNEL E., DE VILLELE O., LACROZE F., (1992) - Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne. Centre Commun de Recherche, CCE, Luxembourg, EUR 14223 FR.
- COUDRAIN A., THIERY D., (1978) - Estimation des pluies efficaces avec l'algorithme de Turc. Influence du pas de temps de calcul et de l'utilisation de données moyennes. Rapport BRGM 78 SGN 640 HYD, 62 p.
- DELAROZIERE-BOUILLIN O., (1971) - Utilisation comparée des formules de Thornthwaite, Turc mensuelle, Turc annuelle et Penman pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne. Application au territoire français. Rapport BRGM 71 SGN 173 HYD, 19 p.
- HARGREAVES G.H., (1974) - Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Trans. ASAE*, n° 17, p. 701-704.
- HARGREAVES G.H., (1994) - Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, vol. 120, n° 6, p. 1132-1139.
- HARGREAVES G.L., HARGREAVES G.H., RILEY J.P., (1985) - An agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, vol. 111, p. 113-124.
- LOUVRIER M., MARGAT J., (1983) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946 - 1976) - Carte à 1/1 500 000. Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, 40 p.
- MONTEITH J.L., (1965) - Evaporation and environnement. *Proc. 19<sup>th</sup> Symp. Soc. Exp. Biol.*, Swansea, Cambridge University Press, p. 205-234.
- MORI A., (1982) - Notice et carte au 1/2 000 000 des réserves en eau utiles des sols de France. INRA, 54 p.
- PENMAN H.L., (1948) - Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A 193, p. 120-146.
- THORNTHWAITE C.W., (1948) - An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Review*, n° 38, p. 55-95.
- TURC L., (1961) - Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agronomiques* 12(1), p. 13-49.

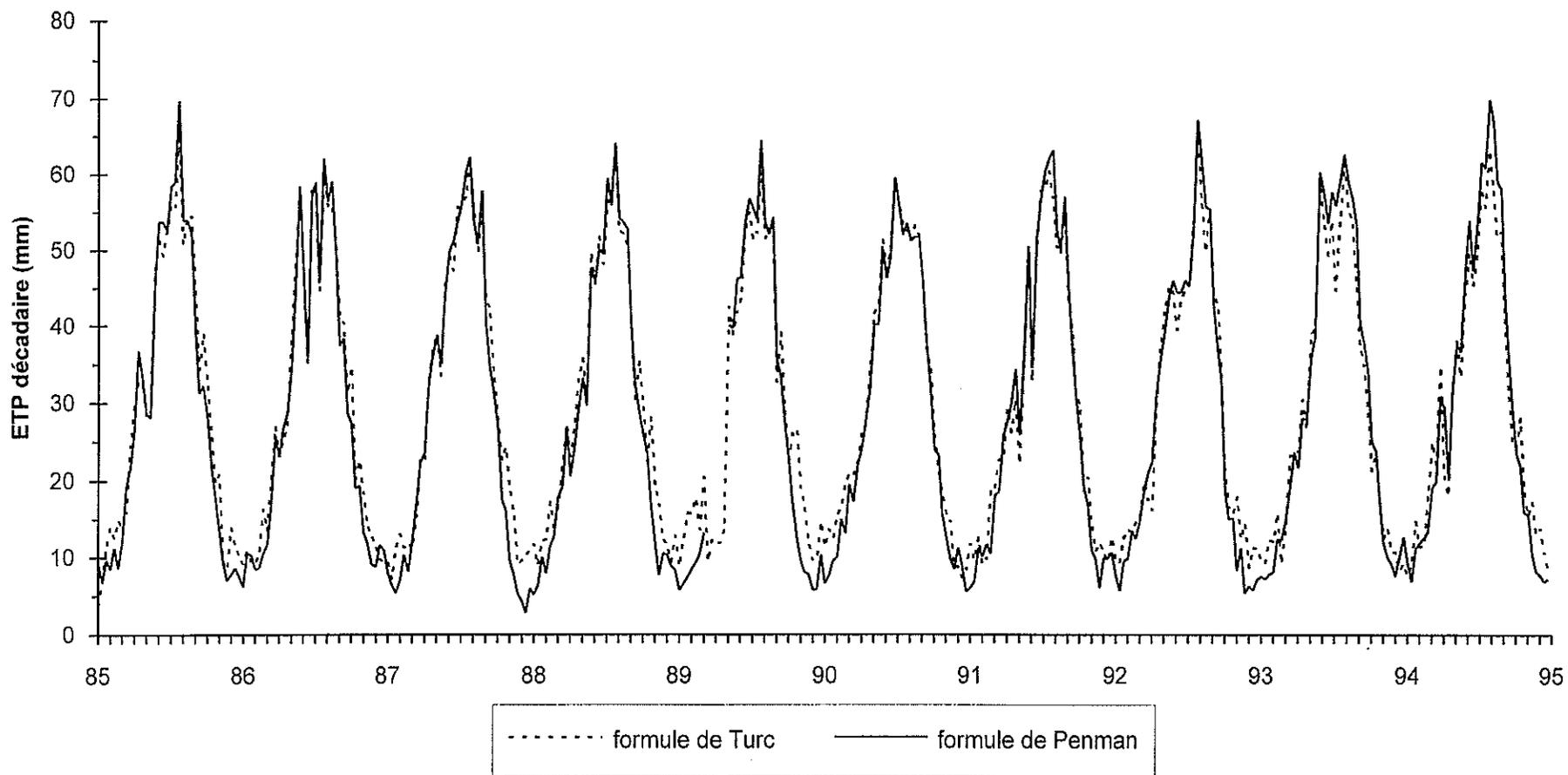
## **ANNEXES**

## **ANNEXE 1**

### **Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle de 1985 à 1994, sur 10 stations météorologiques**

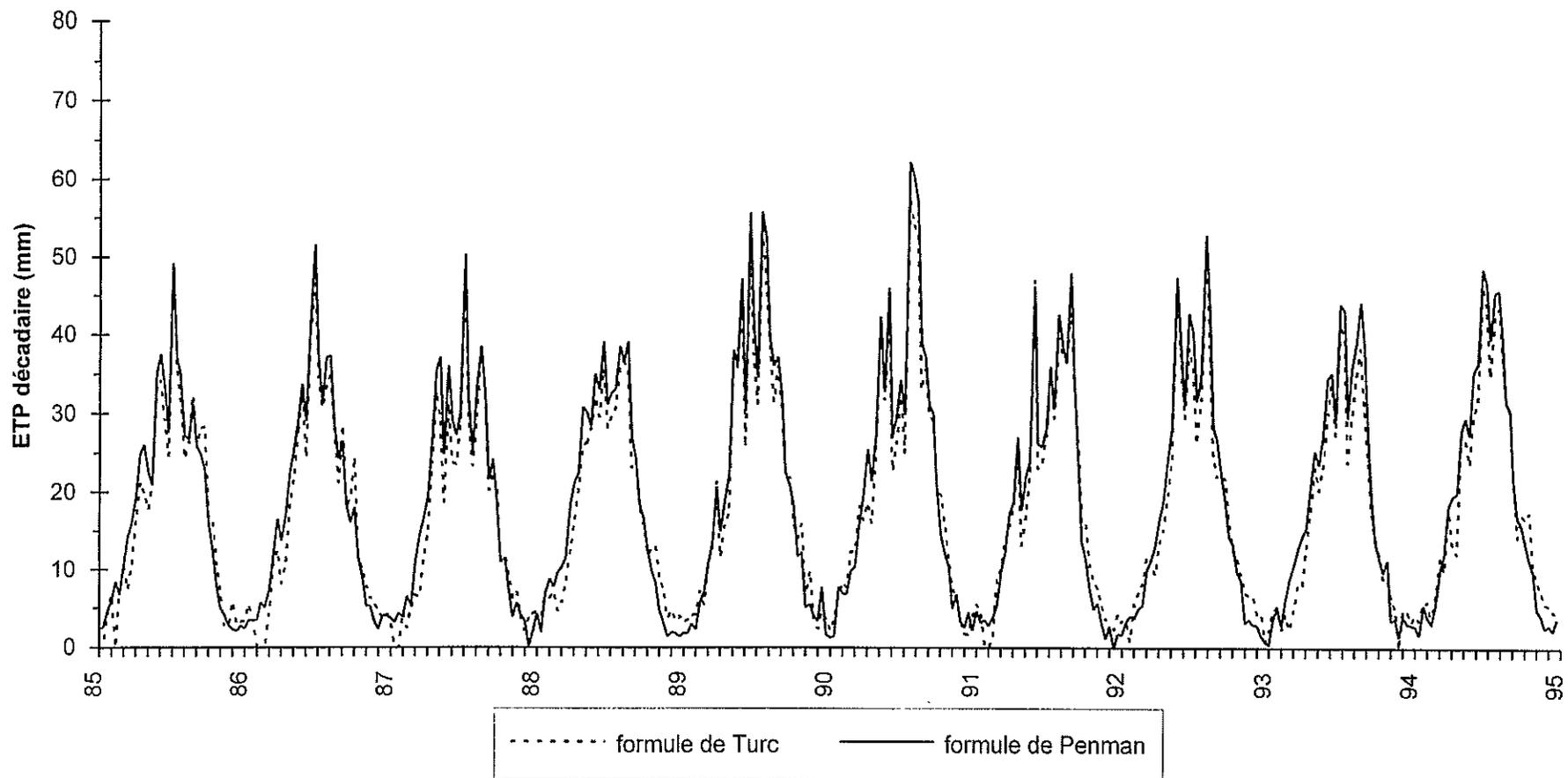
- Ajaccio
- Alençon
- Carpentras
- Châteauroux
- Langres
- Millau
- Mont-de-Marsan
- Saint-Girons
- Saint-Quentin
- Vichy

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique d'Ajaccio (20)**



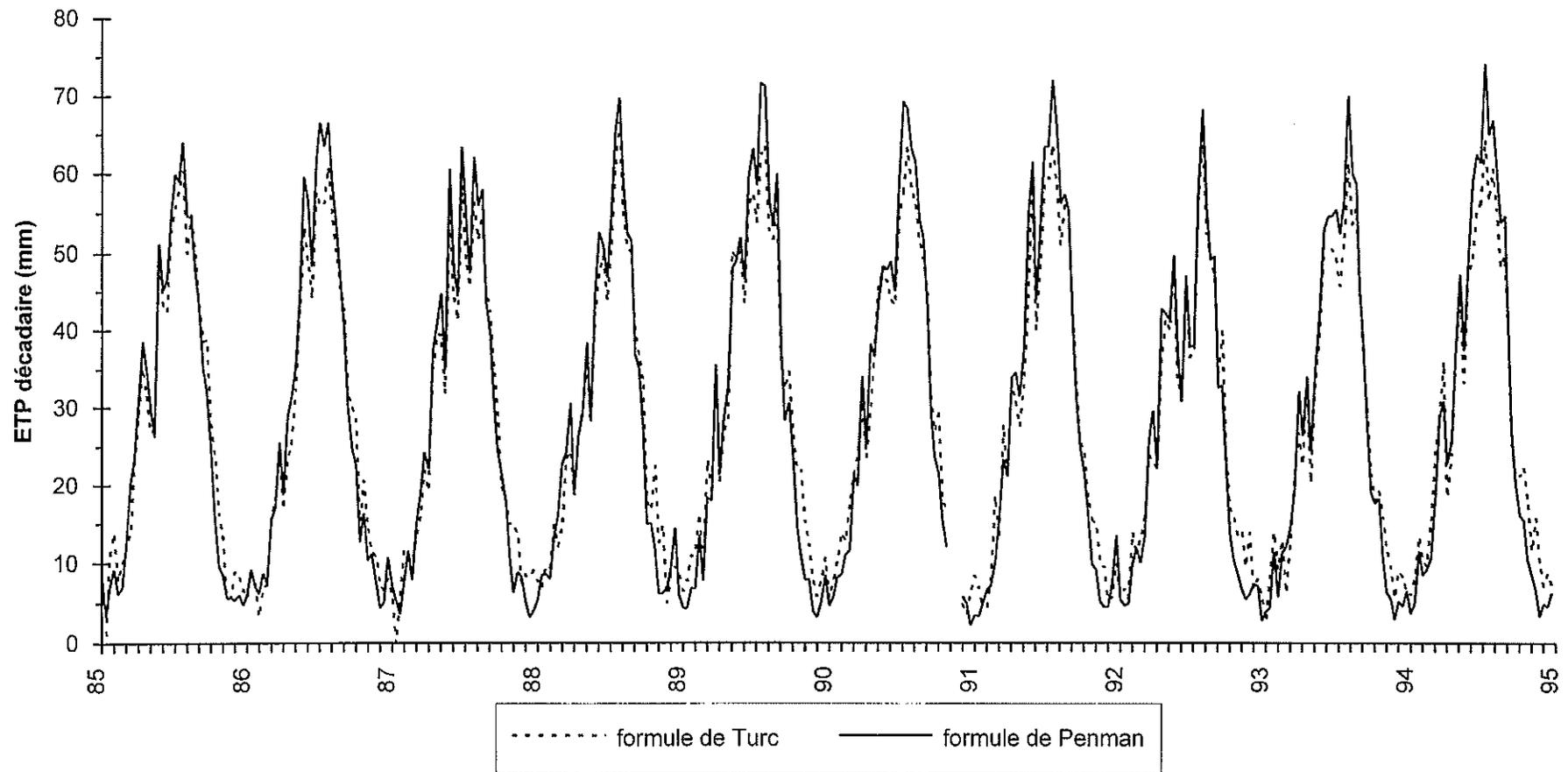
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique d'Alençon (61)**



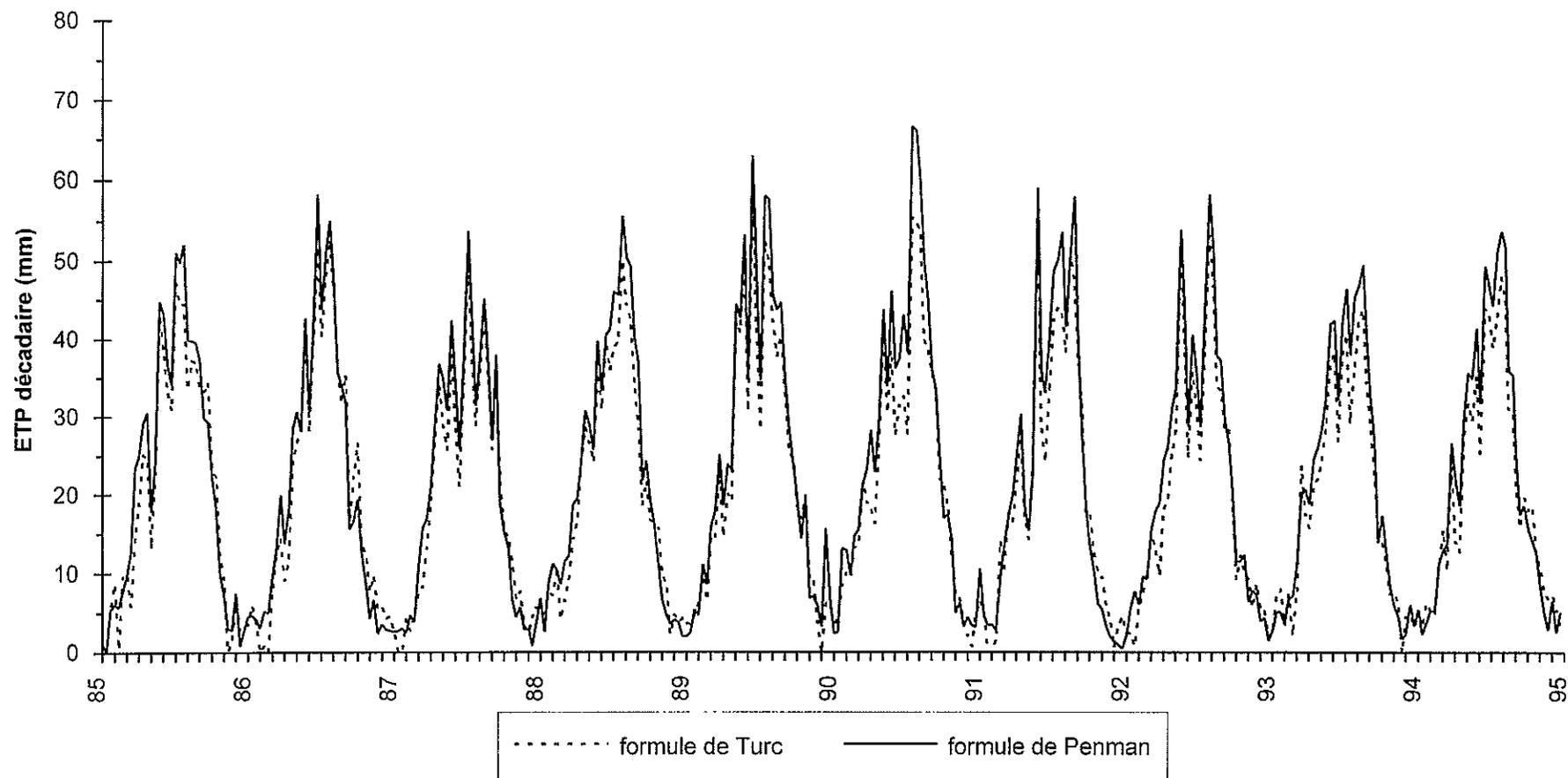
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Carpentras (84)**



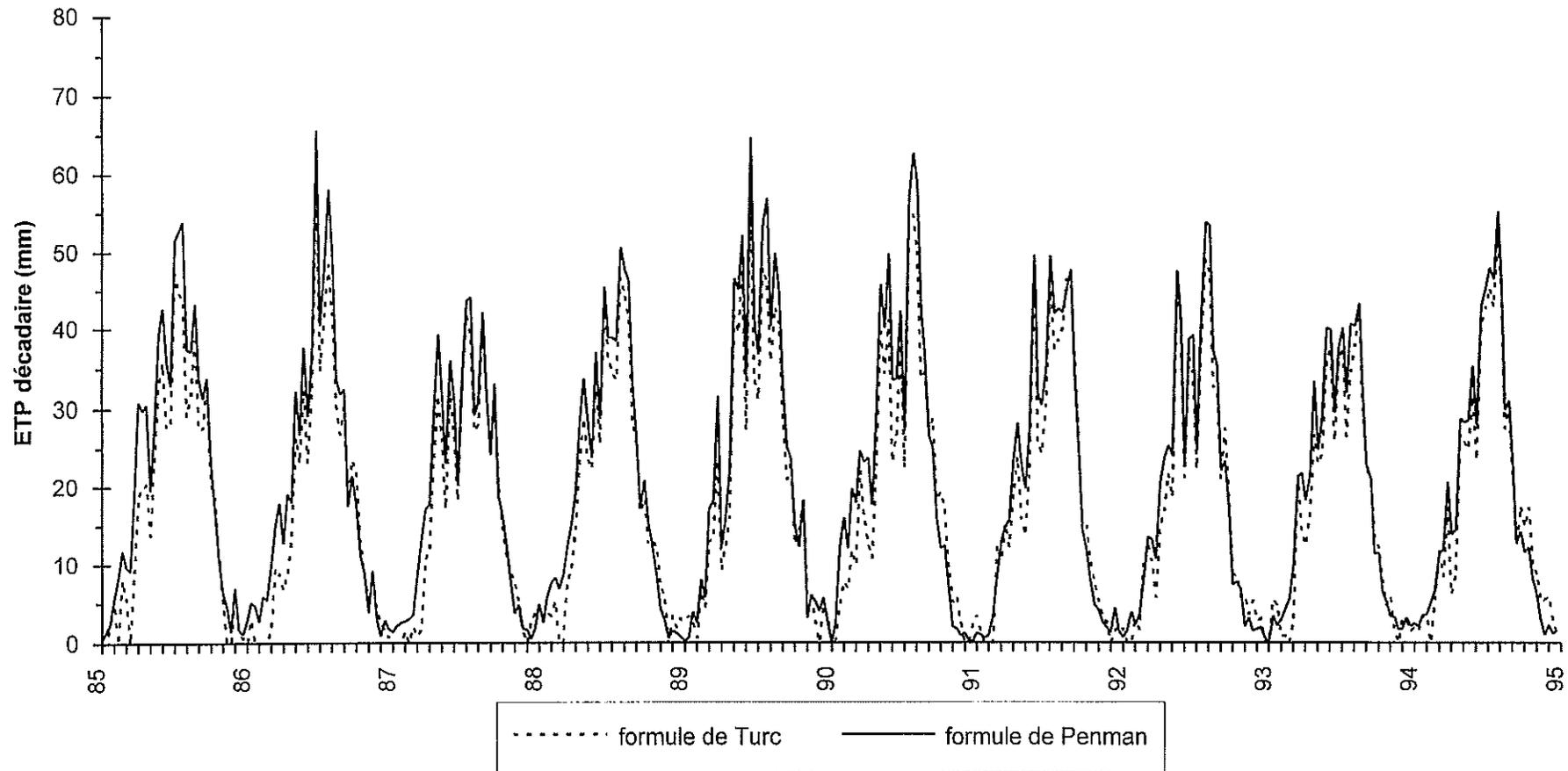
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Châteauroux (36)**



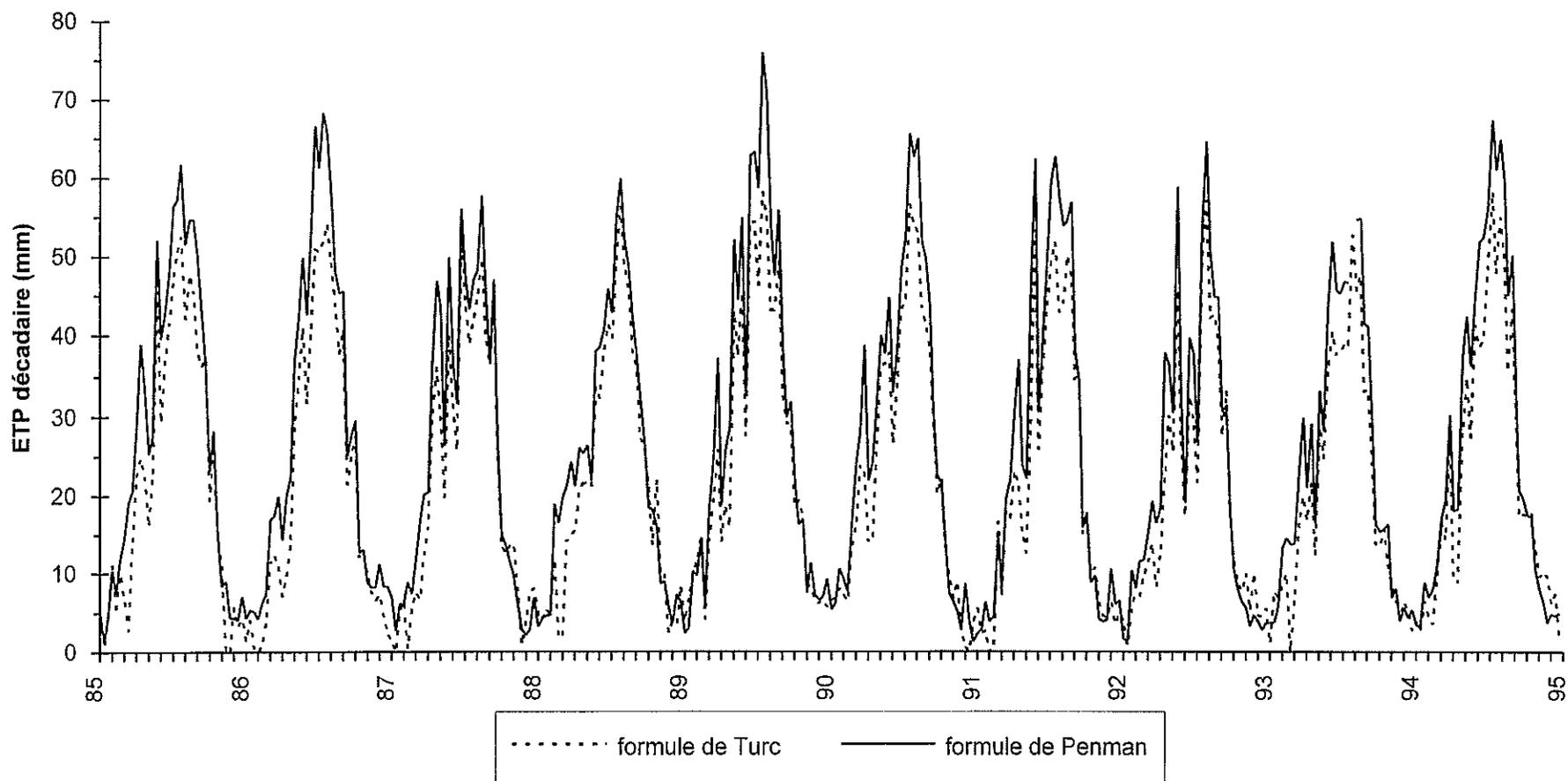
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Langres (52)**



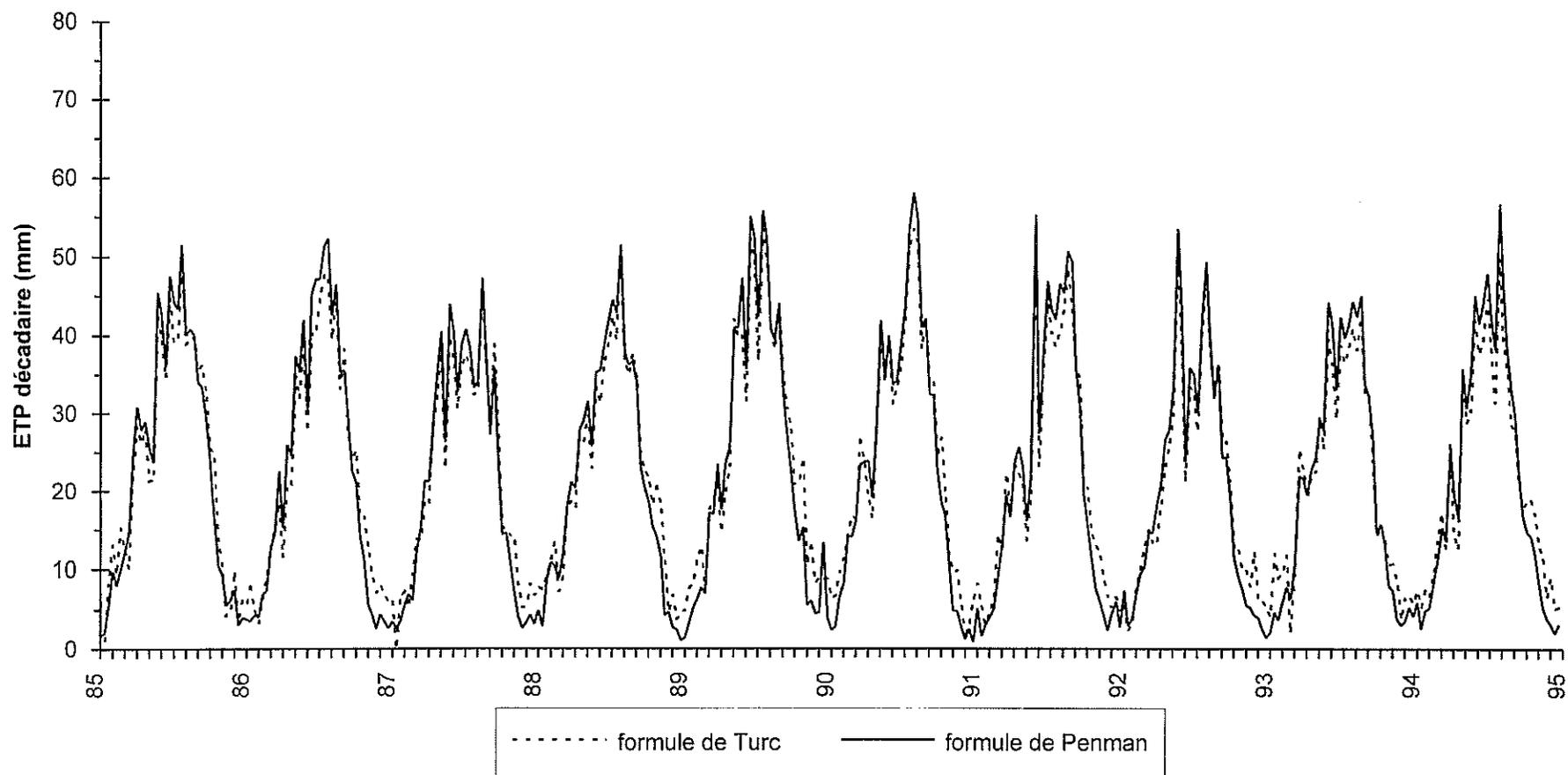
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Millau (12)**



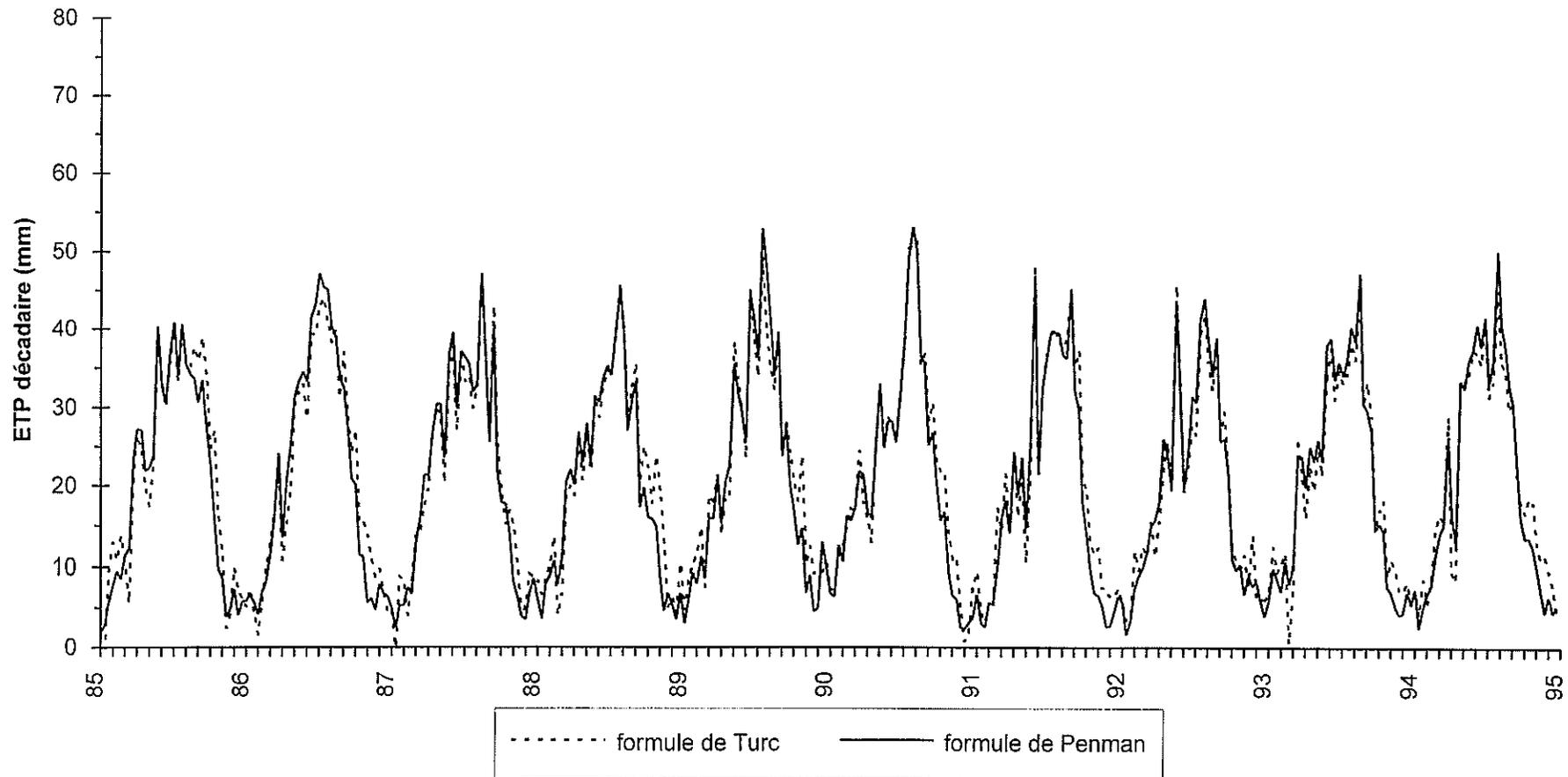
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Mont-de-Marsan (40)**



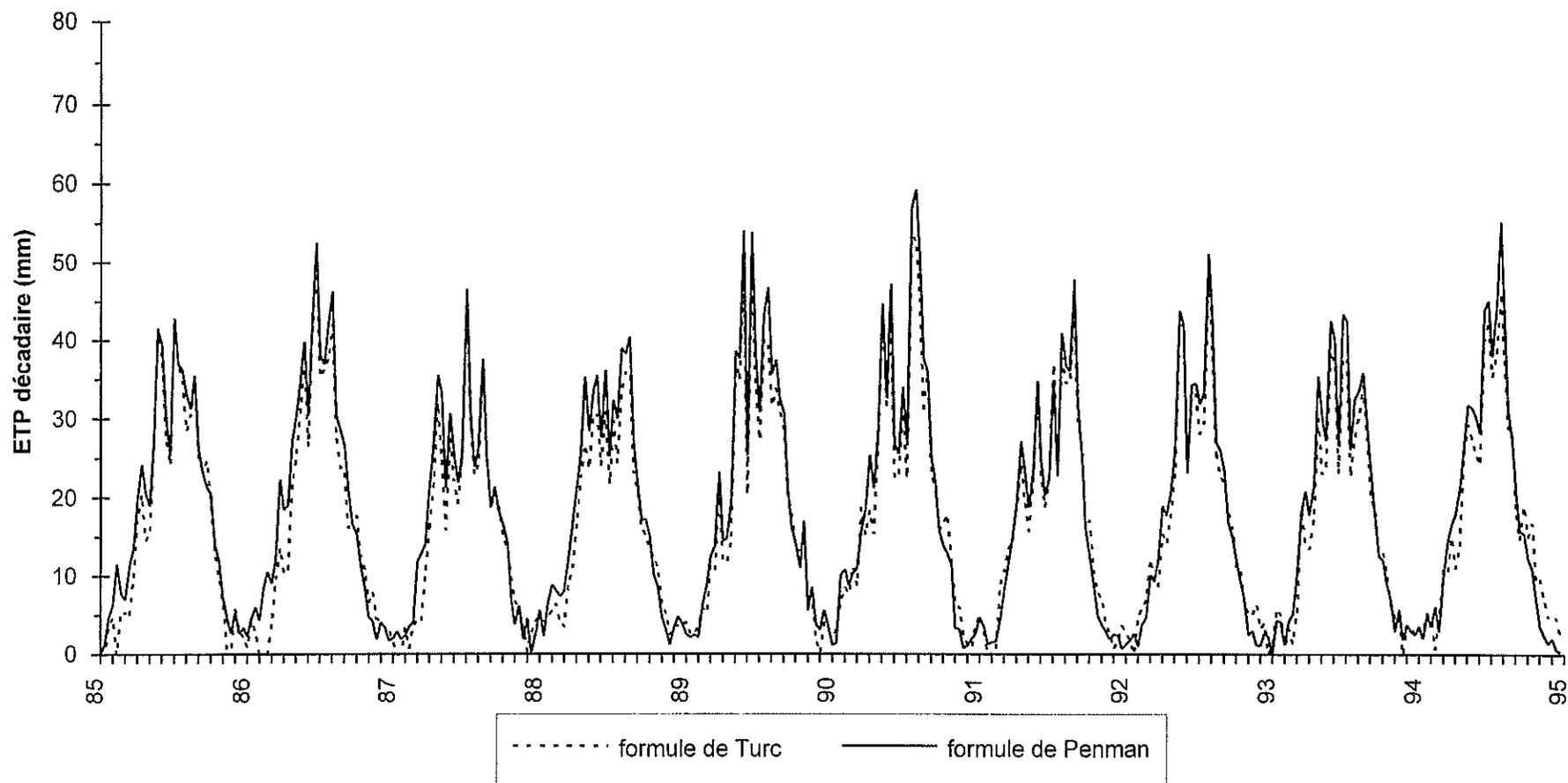
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Saint-Girons (09)**



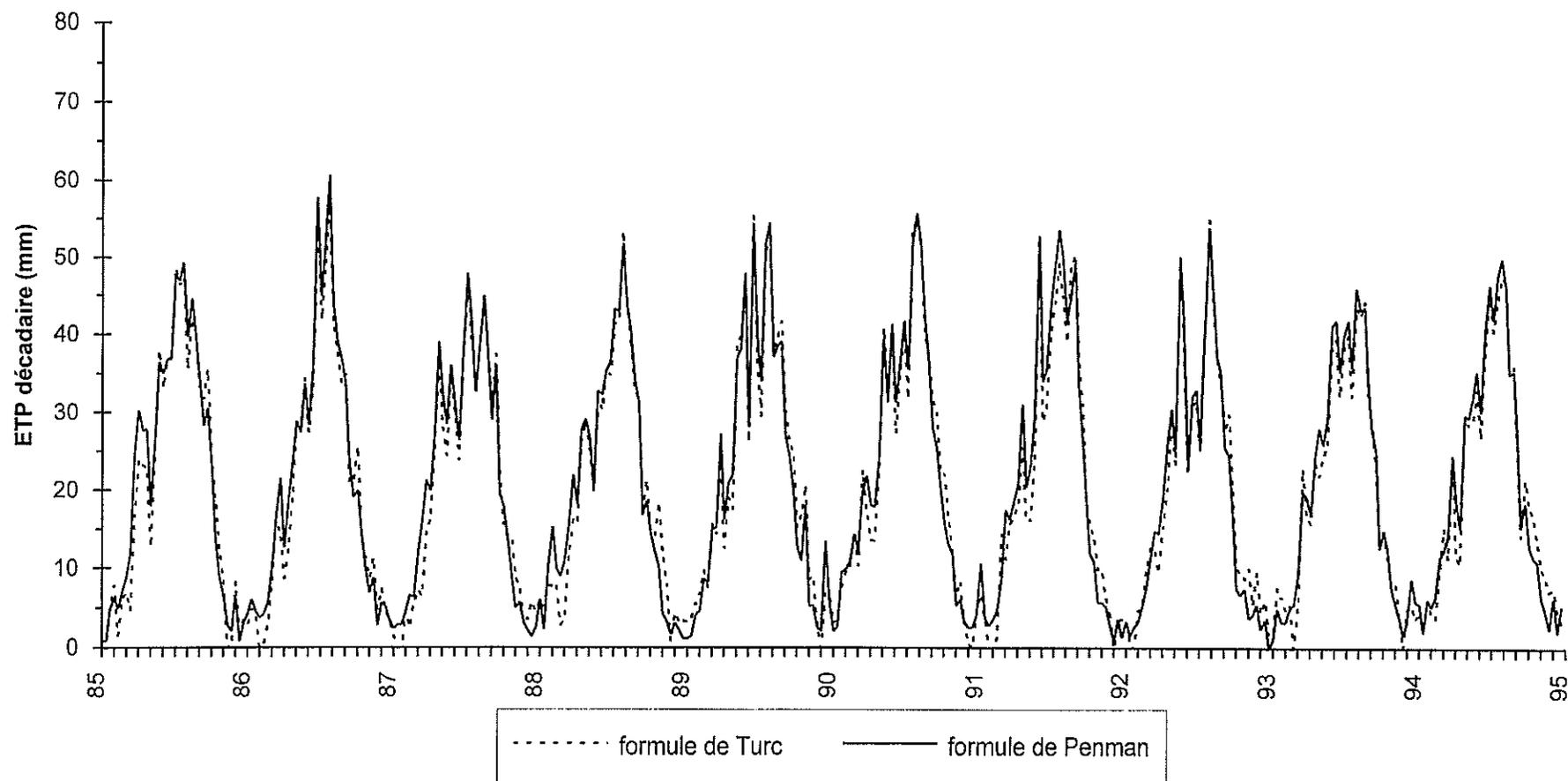
Origine des données: Météo-France

**Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994)  
à la station météorologique de Saint-Quentin (02)**



Origine des données: Météo-France

### Evolution comparée de l'évapotranspiration potentielle (1985-1994) à la station météorologique de Vichy (03)



Origine des données: Météo-France

## **ANNEXE 2**

**Calculs des précipitations efficaces moyennes annuelles  
sur 30 ans (1965 - 1994) pour 54 stations météorologiques**

Hypothèses sur la valeur de la réserve maximale en eau

*Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994)*

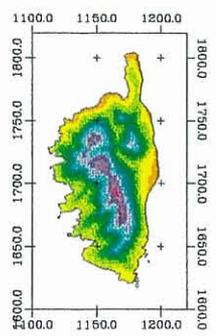
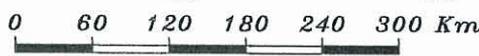
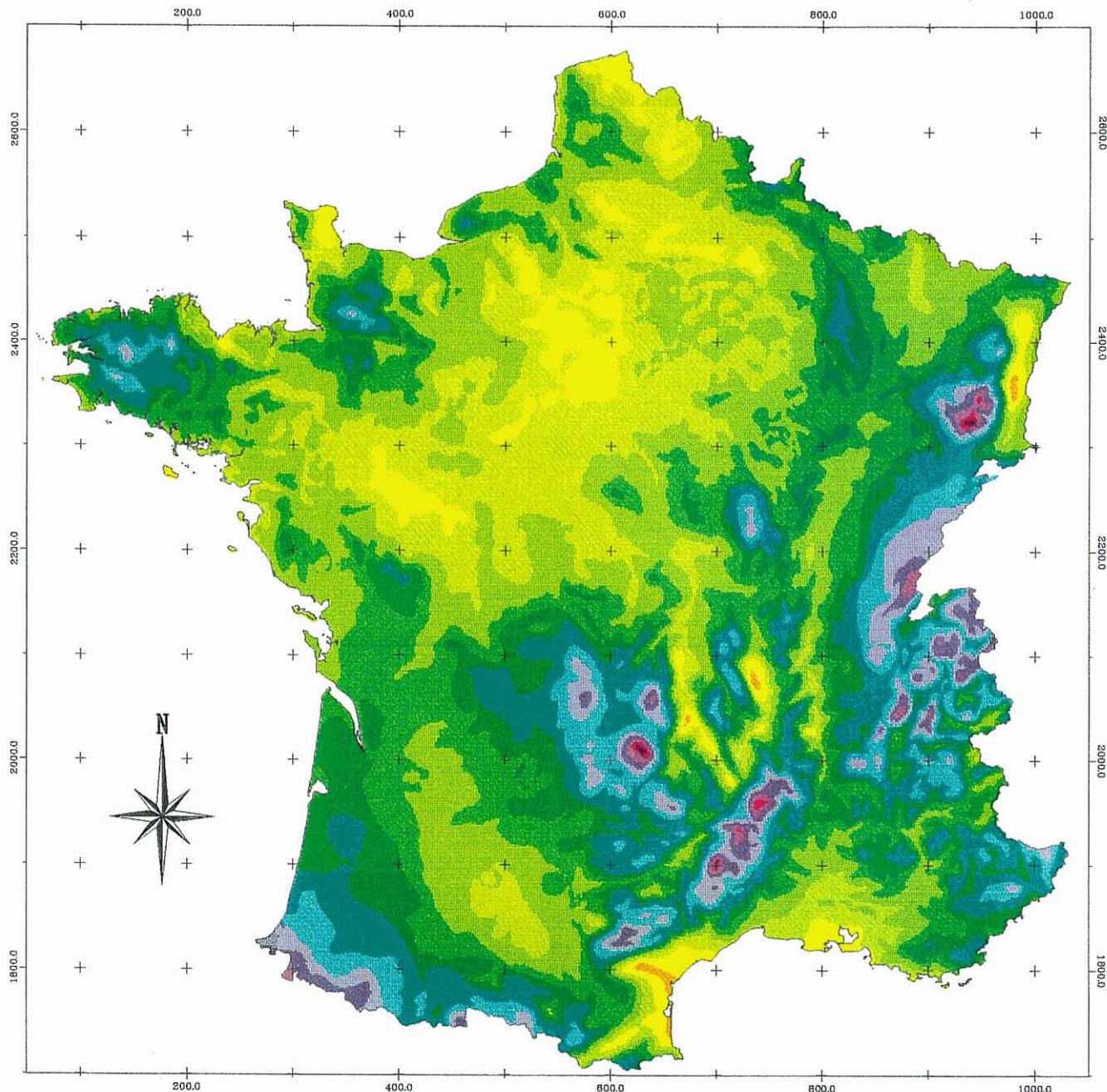
| Nom de la station<br>météorologique | Pluie<br>totale<br>(mm) | R.U.<br>basse<br>(mm) | Pluie<br>efficace<br>(mm) | R.U.<br>moyenne<br>(mm) | Pluie<br>efficace<br>(mm) | R.U.<br>haute<br>(mm) | Pluie<br>efficace<br>(mm) |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| AGEN                                | 734.3                   | 60                    | 260.6                     | 110                     | 205.3                     | 160                   | 155                       |
| AMBERIEU                            | 1163                    | 80                    | 604.6                     | 130                     | 561.8                     | 180                   | 534                       |
| ANGERS                              | 638.4                   | 80                    | 211                       | 130                     | 160.1                     | 180                   | 112.1                     |
| AUXERRE                             | 677.8                   | 80                    | 203.3                     | 130                     | 153.7                     | 180                   | 113.2                     |
| BASTIA                              | 790.3                   | 50                    | 371.4                     | 70                      | 337.3                     | 90                    | 312.2                     |
| BEAUVAIS                            | 671.7                   | 200                   | 109.4                     | 250                     | 89.4                      | 300                   | 79.7                      |
| BESANCON                            | 1126                    | 50                    | 621.2                     | 70                      | 591.4                     | 90                    | 572.8                     |
| BIARRITZ                            | 1502                    | 60                    | 866.2                     | 110                     | 803.3                     | 160                   | 764.2                     |
| BORDEAUX                            | 962.5                   | 50                    | 478.1                     | 70                      | 449.1                     | 90                    | 427.3                     |
| BOURG-ST-MAURICE                    | 983.9                   | 50                    | 498.3                     | 100                     | 434.9                     | 150                   | 390.2                     |
| BOURGES                             | 735.2                   | 50                    | 277.2                     | 70                      | 247.1                     | 90                    | 223.9                     |
| BREST                               | 1111                    | 50                    | 660.9                     | 70                      | 636.3                     | 90                    | 616.3                     |
| CAEN                                | 721.6                   | 200                   | 143.4                     | 250                     | 115.6                     | 300                   | 105.5                     |
| CAZAUX                              | 966.9                   | 50                    | 498.7                     | 70                      | 470.2                     | 90                    | 448.2                     |
| CHARTRES                            | 590.3                   | 150                   | 93.9                      | 200                     | 59.5                      | 250                   | 35.1                      |
| CHATEAUDUN                          | 616.5                   | 50                    | 225                       | 70                      | 198.7                     | 90                    | 176.8                     |
| CLERMONT                            | 609.5                   | 100                   | 60.8                      | 150                     | 32.8                      | 200                   | 17.9                      |
| COGNAC                              | 798.4                   | 200                   | 192.3                     | 250                     | 152.4                     | 300                   | 121                       |
| COLMAR                              | 577.9                   | 80                    | 106.1                     | 130                     | 64.9                      | 180                   | 36.3                      |
| DINARD                              | 741.9                   | 100                   | 252.6                     | 150                     | 203.4                     | 200                   | 160.2                     |
| LA ROCHELLE                         | 764.1                   | 30                    | 386.1                     | 50                      | 347.9                     | 70                    | 322.7                     |
| LANGRES                             | 897.9                   | 50                    | 434.3                     | 70                      | 404.7                     | 90                    | 381.6                     |
| LE-BOURGET                          | 659.6                   | 200                   | 80.1                      | 250                     | 55.7                      | 300                   | 42.9                      |
| LE-MANS                             | 678.8                   | 80                    | 234                       | 130                     | 182.5                     | 180                   | 135                       |
| LUXEUIL                             | 1055                    | 100                   | 511.7                     | 150                     | 485.8                     | 200                   | 473.8                     |
| LYON                                | 847.2                   | 80                    | 289.9                     | 130                     | 236.9                     | 180                   | 193.2                     |
| MACON                               | 857.9                   | 60                    | 356.5                     | 110                     | 298.8                     | 160                   | 252.2                     |
| MARIGNANE                           | 538.9                   | 50                    | 153.7                     | 100                     | 95.3                      | 150                   | 63.1                      |
| METZ                                | 768.5                   | 150                   | 223                       | 200                     | 189.2                     | 250                   | 163.7                     |
| MONT-DE-MARSAN                      | 974.9                   | 50                    | 488.2                     | 70                      | 461                       | 90                    | 437.9                     |
| MONTELMAR                           | 917                     | 50                    | 414.4                     | 70                      | 373.5                     | 90                    | 345.2                     |
| MONTPELLIER                         | 414.2                   | 50                    | 256.8                     | 70                      | 220.8                     | 90                    | 194.8                     |
| NANCY                               | 768.8                   | 150                   | 218.7                     | 200                     | 189.1                     | 250                   | 166.7                     |
| NANTES                              | 789.8                   | 80                    | 338.6                     | 130                     | 287.4                     | 180                   | 237.4                     |
| NEVERS                              | 813.1                   | 60                    | 352.5                     | 110                     | 297.5                     | 160                   | 254.7                     |
| NICE                                | 782.7                   | 30                    | 390                       | 50                      | 328.2                     | 70                    | 294                       |
| NIMES                               | 750.7                   | 50                    | 283.4                     | 70                      | 246.9                     | 90                    | 222.1                     |
| ORLEANS                             | 639.5                   | 60                    | 211.8                     | 110                     | 160.2                     | 160                   | 113.1                     |
| PARIS                               | 652.4                   | 80                    | 170                       | 130                     | 117.8                     | 180                   | 72.8                      |
| PAU                                 | 1128                    | 80                    | 571.5                     | 130                     | 526.8                     | 180                   | 491.6                     |
| PERPIGNAN                           | 578.1                   | 50                    | 187.4                     | 70                      | 153.6                     | 90                    | 129.7                     |
| POITIERS                            | 697.7                   | 50                    | 261.9                     | 70                      | 237.6                     | 90                    | 217.3                     |
| REIMS                               | 616.3                   | 200                   | 67.9                      | 250                     | 50.5                      | 300                   | 43.2                      |
| RENNES                              | 656.2                   | 100                   | 200.6                     | 150                     | 149                       | 200                   | 103                       |
| ST-AUBAN                            | 733.7                   | 50                    | 226.4                     | 100                     | 151.6                     | 150                   | 105.9                     |
| ST-GIRONS                           | 1024                    | 50                    | 508.4                     | 70                      | 482.6                     | 90                    | 461.3                     |
| ST-QUENTIN                          | 700.9                   | 200                   | 136.7                     | 250                     | 118.7                     | 300                   | 108                       |
| ST-RAPHAEL                          | 819.4                   | 50                    | 384.4                     | 70                      | 349.1                     | 90                    | 322.9                     |
| STRASBOURG                          | 624.7                   | 80                    | 121.7                     | 130                     | 77.9                      | 180                   | 50.1                      |
| TARBES                              | 1114                    | 80                    | 548.6                     | 130                     | 502.2                     | 180                   | 469.5                     |
| TOULON                              | 650.3                   | 30                    | 297.7                     | 50                      | 240.3                     | 70                    | 206.4                     |
| TOULOUSE                            | 674.8                   | 60                    | 199.7                     | 110                     | 141.1                     | 160                   | 95.4                      |
| TRAPPES                             | 683.9                   | 100                   | 206.2                     | 150                     | 156.9                     | 200                   | 122.4                     |
| VICHY                               | 796.7                   | 50                    | 314.7                     | 70                      | 283.8                     | 90                    | 259.8                     |

## **ANNEXE 3**

### **Cartes au 1/6 000 000**

- Précipitations (Météo-France)
- Réserves utiles en eau des sols (INRA)
- Précipitations efficaces moyennes annuelles avec trois hypothèses de réserves maximales en eau des sols (haute, moyenne, basse)

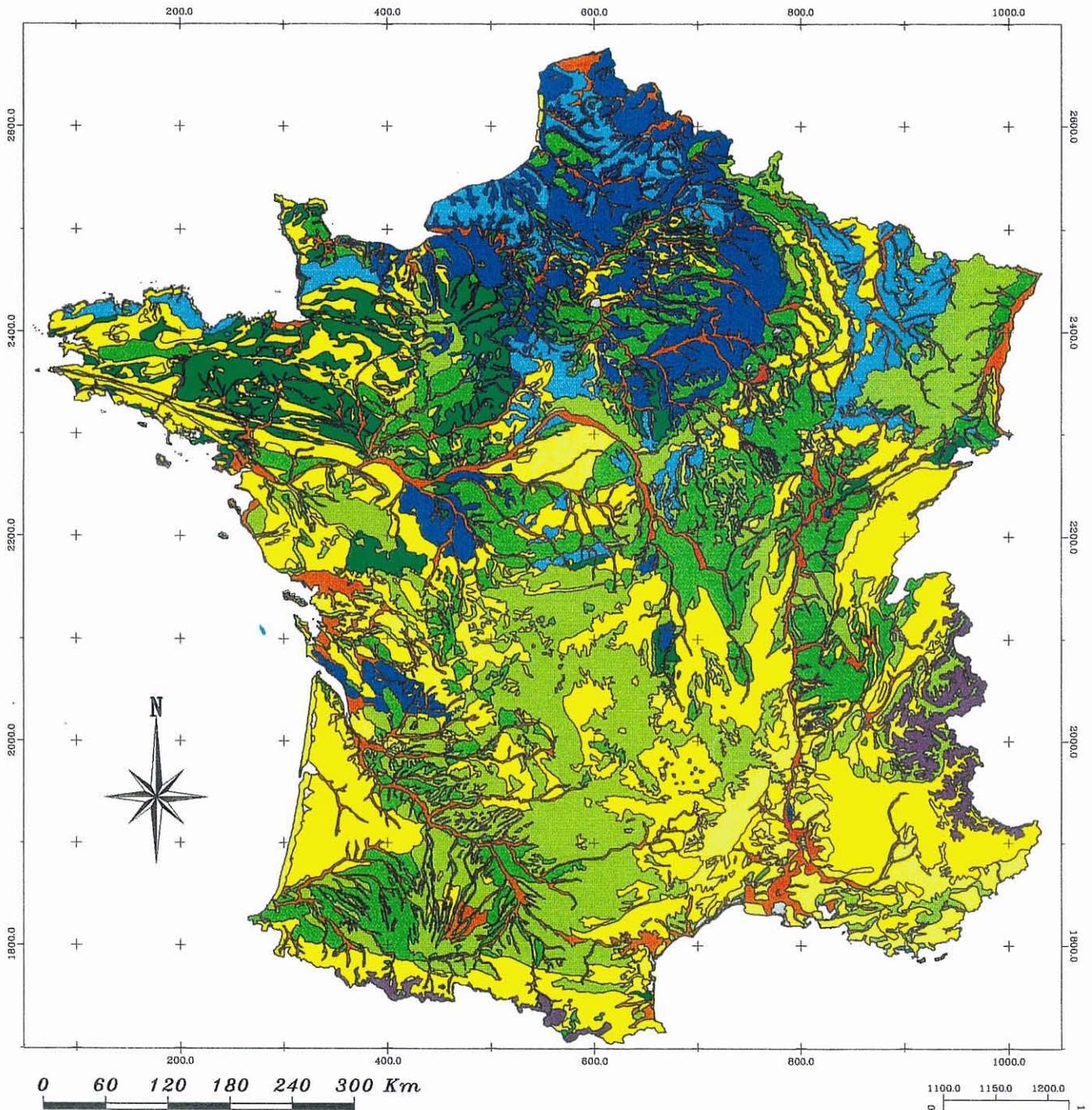
# PRECIPITATIONS TOTALES ANNUELLES EN FRANCE (1951-1980)



|   |                 |   |                   |   |                   |
|---|-----------------|---|-------------------|---|-------------------|
|  | Moins de 400 mm |  | De 800 a 900 mm   |  | De 1600 a 1800 mm |
|  | De 400 a 500 mm |  | De 900 a 1000 mm  |  | De 1800 a 2000 mm |
|  | De 500 a 600 mm |  | De 1000 a 1200 mm |  | De 2000 a 2200 mm |
|  | De 600 a 700 mm |  | De 1200 a 1400 mm |  | De 2200 a 2400 mm |
|  | De 700 a 800 mm |  | De 1400 a 1600 mm |  | Plus de 2400 mm   |

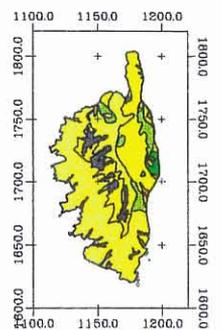
Origine des donnees : Meteo France  
Infographie : BRGM

# CARTE DES CLASSES DES RESERVES EN EAU UTILE DE LA FRANCE

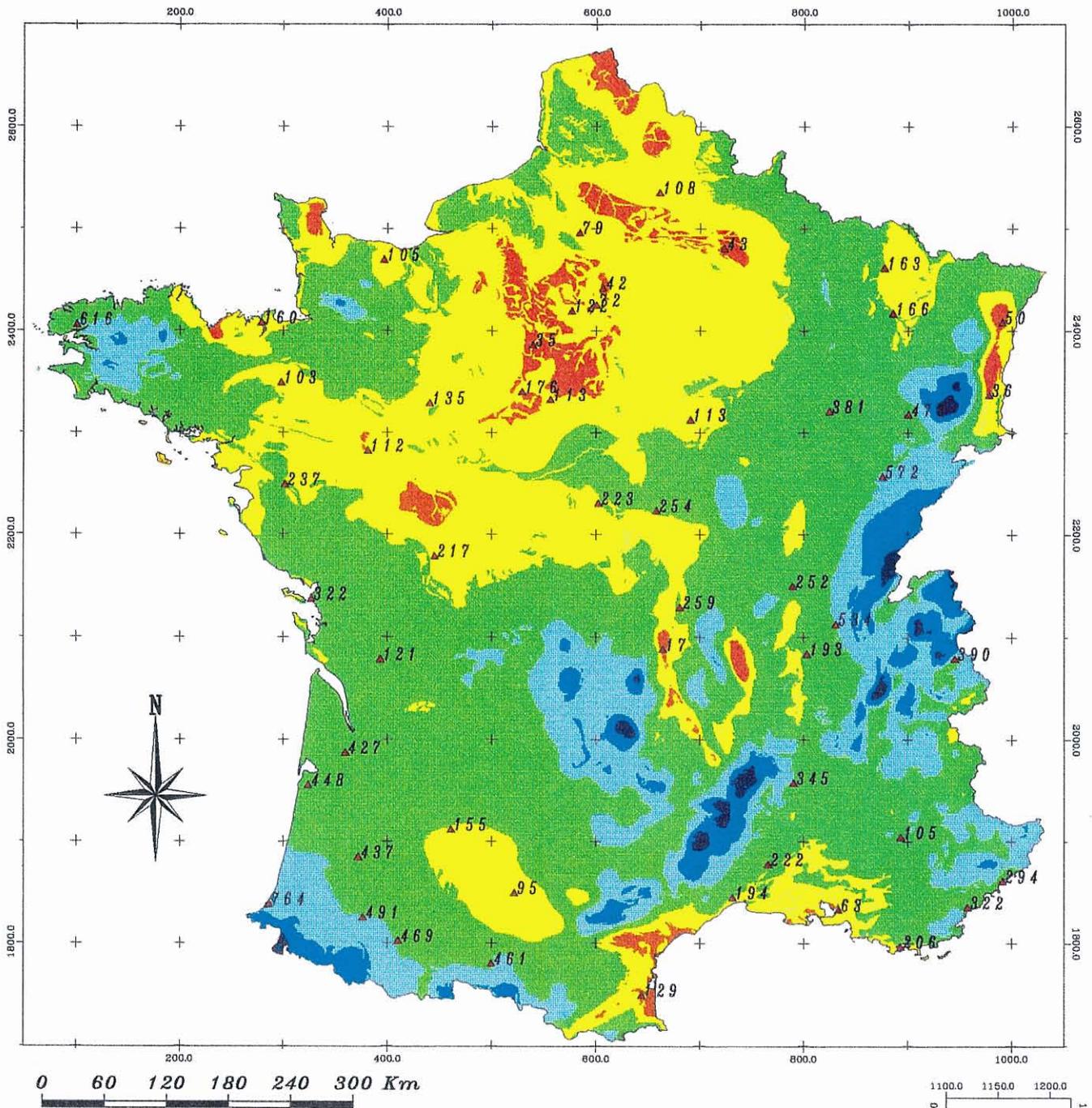


|   |   |
|---|---|
|  | Lacs, etangs, roches affleurantes et zones urbanisees                         |
|  | Sols d'altitude superieure a 2000 m   |
|  | RU variable, sols de vallees a reserve influencee par la presence de la nappe |
|  | RU < 70 mm sur la totalite  |
|  | RU < 70 mm sur plus de 50%  |
|  | 200 mm > RU > 70 mm sur plus de 50%, < 70 mm sur le reste                     |
|  | 200 mm > RU > 70 mm sur la totalite   |
|  | 200 mm > RU > 70 mm sur plus 50% , > 200 mm sur le reste                      |
|  | RU > 200 mm sur plus de 50%   |
|  | RU > 200 mm   |

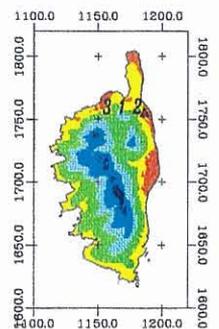
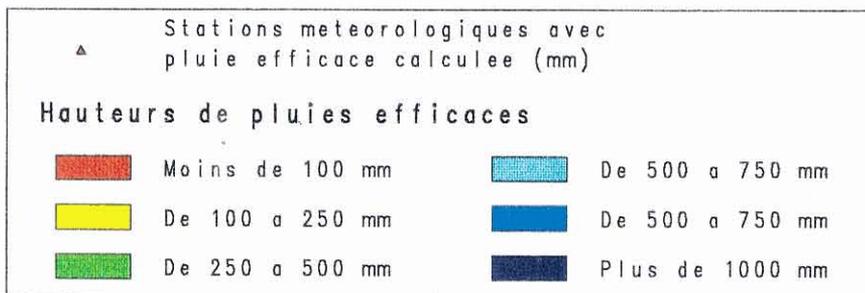
Origine des donnees : INRA  
Infographie : BRGM



# PRECIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES EN FRANCE ( 1965-1994 )



## Hypothese maximale sur les valeurs de reserve utile

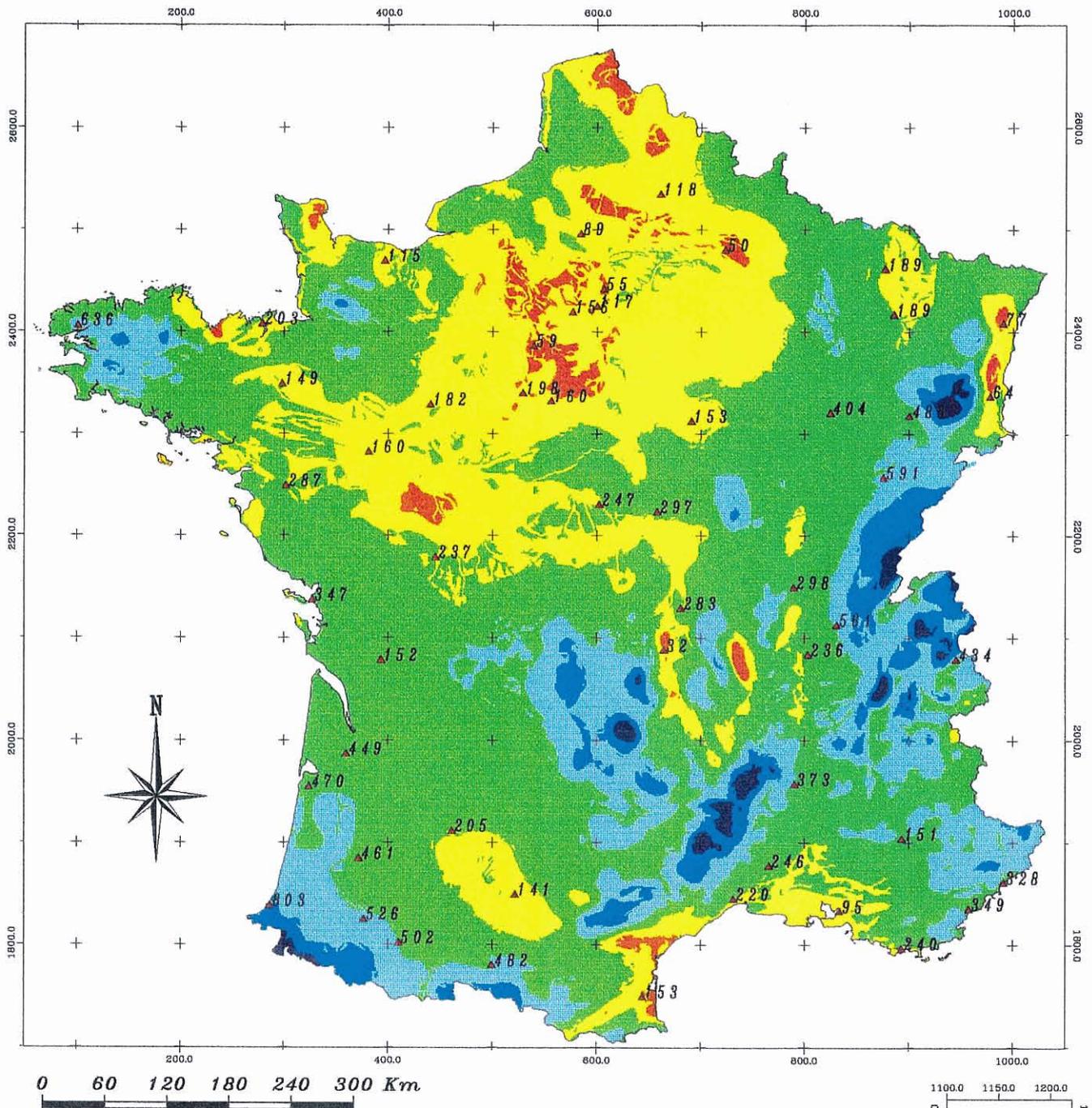


Origine des donnees : Meteo France, INRA  
Infographie et traitement des donnees : BRGM

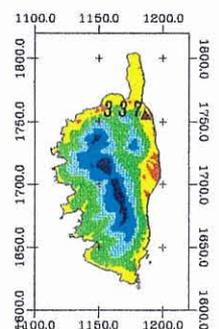
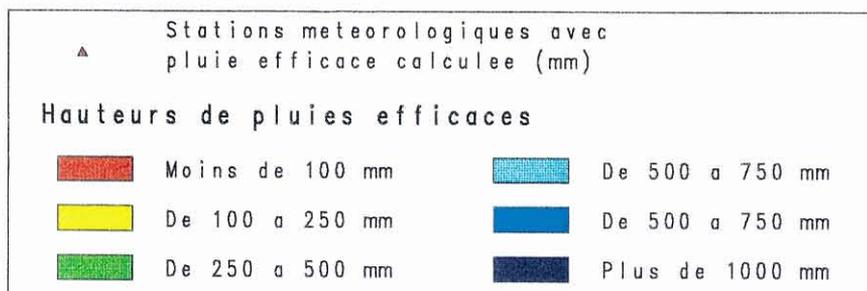


Rapport R38975

# PRECIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES EN FRANCE ( 1965-1994 )



## Hypothese moyenne sur les valeurs de reserve utile

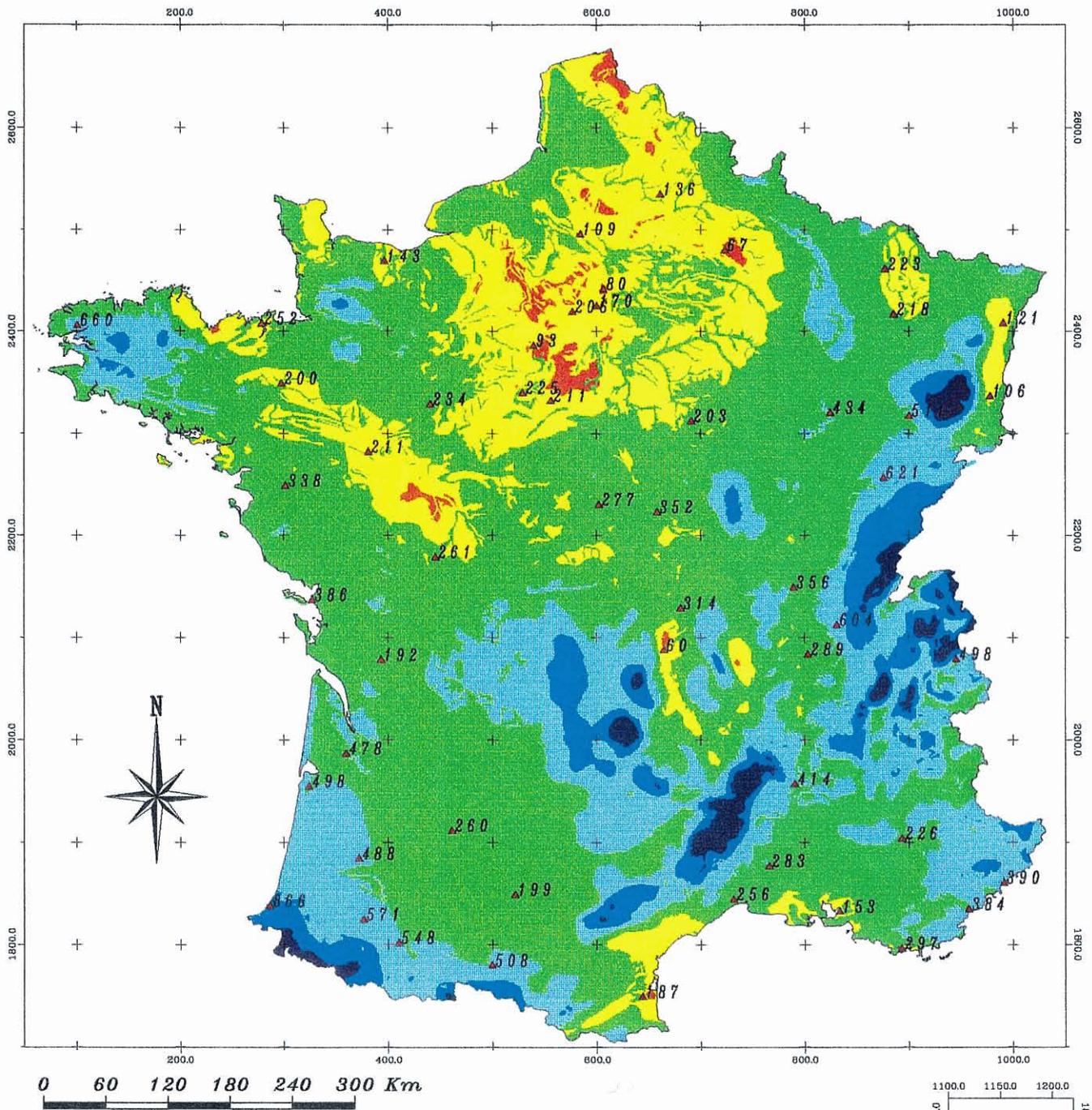


Origine des donnees : Meteo France, INRA  
Infographie et traitement des donnees : BRGM

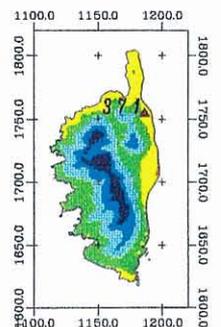
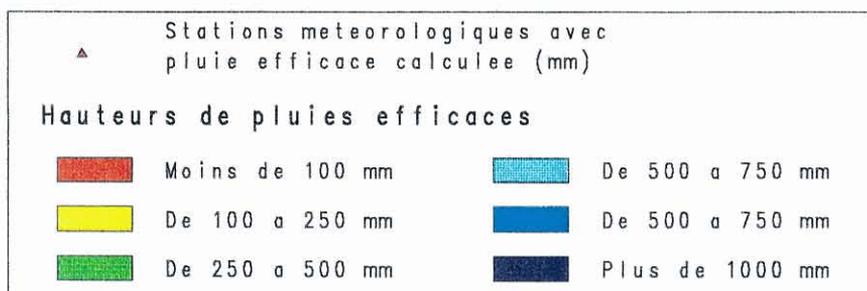


Rapport R36975

# PRECIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES EN FRANCE ( 1965-1994 )



## Hypothese minimale sur les valeurs de reserve utile

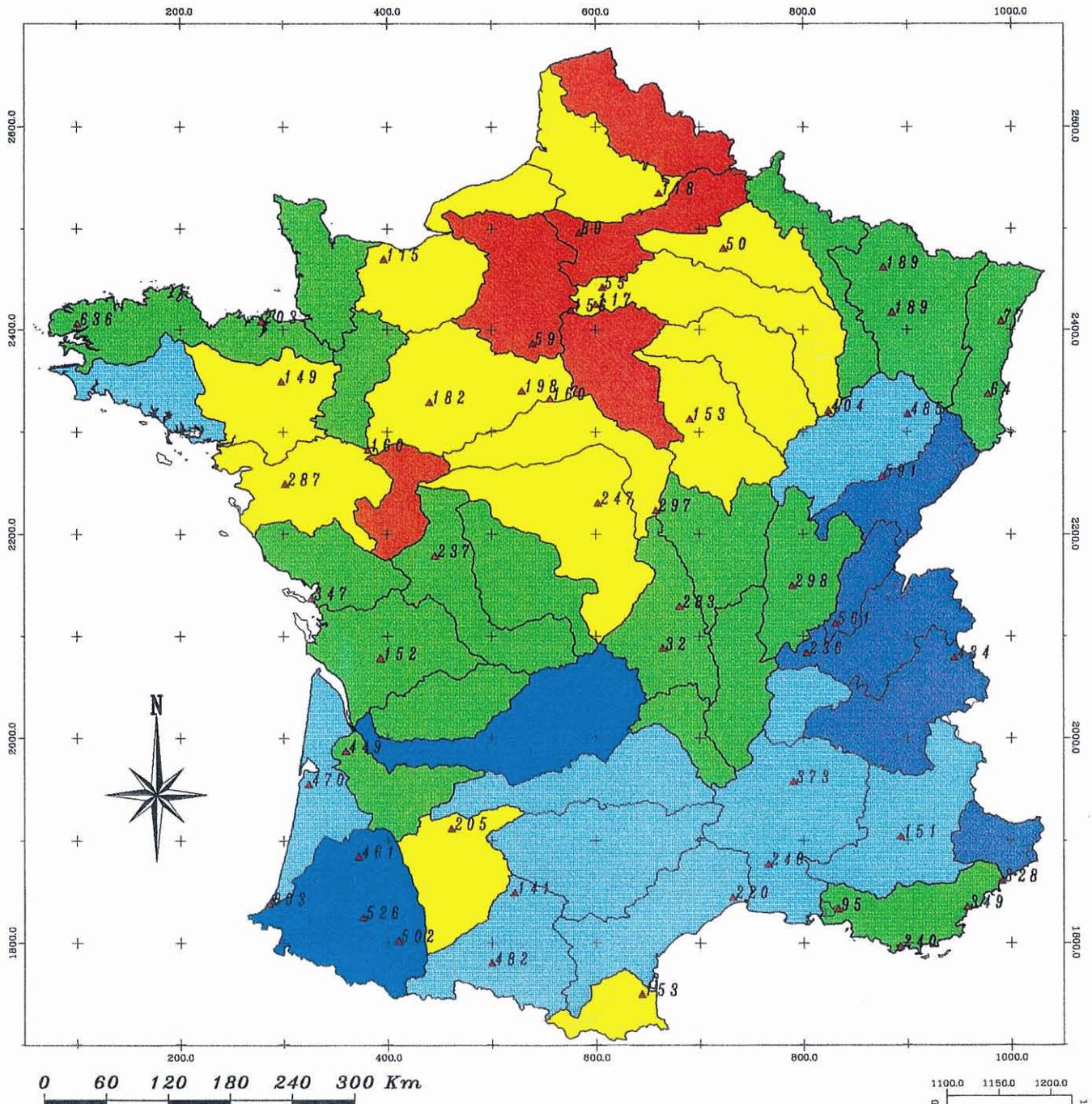


Origine des donnees : Meteo France, INRA  
Infographie et traitement des donnees : BRGM

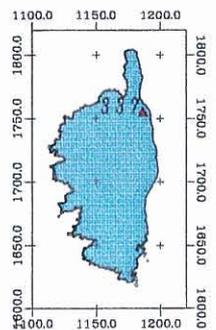
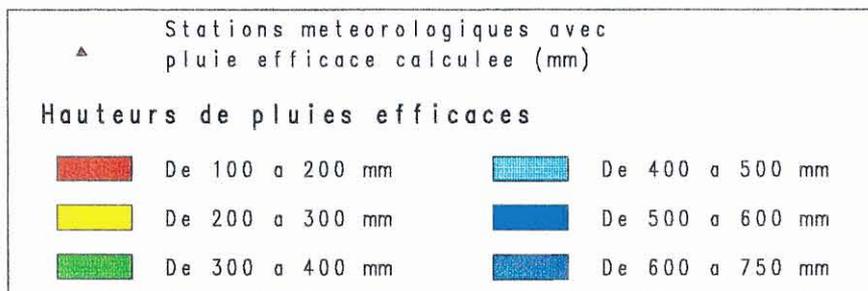


Rapport R38975

# PRECIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES POUR LES 55 BASSINS RNDE (1965-1994)



## Hypothese moyenne sur les valeurs de reserve utile



Origine des donnees : Meteo France, INRA  
Infographie et traitement des donnees : BRGM



Rapport R38975

## **ANNEXE 4**

**Tableau et carte des précipitations efficaces moyennes annuelles  
(hypothèse moyenne de réserve maximale en eau des sols)  
réparties sur les 55 bassins versants du RNDE**

*Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965 - 1994)*

| Numéro du bassin versant | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Précipitations totales (mm) |         |         | Précipitations efficaces (mm) |         |         |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|
|                          |                               | minimum                     | maximum | moyenne | minimum                       | maximum | moyenne |
| 101                      | 9 962                         | 538                         | 931     | 692     | 44                            | 396     | 182     |
| 102                      | 10 020                        | 585                         | 915     | 728     | 80                            | 376     | 213     |
| 201                      | 8 257                         | 473                         | 2321    | 872     | 60                            | 1330    | 345     |
| 202                      | 7 964                         | 744                         | 1103    | 874     | 250                           | 538     | 363     |
| 203                      | 15 331                        | 684                         | 2270    | 883     | 173                           | 1298    | 350     |
| 301                      | 10 325                        | 691                         | 918     | 755     | 172                           | 470     | 252     |
| 302                      | 10 882                        | 684                         | 1477    | 806     | 165                           | 786     | 296     |
| 303                      | 9 601                         | 578                         | 811     | 660     | 75                            | 391     | 172     |
| 304                      | 13 815                        | 588                         | 1024    | 768     | 85                            | 536     | 269     |
| 305                      | 7 960                         | 568                         | 1025    | 722     | 68                            | 546     | 224     |
| 306                      | 8 971                         | 588                         | 1047    | 693     | 83                            | 487     | 193     |
| 307                      | 12 240                        | 549                         | 1039    | 666     | 52                            | 441     | 164     |
| 308                      | 4 233                         | 676                         | 1017    | 809     | 162                           | 426     | 275     |
| 309                      | 8 939                         | 584                         | 1224    | 766     | 80                            | 601     | 268     |
| 310                      | 7 543                         | 545                         | 1419    | 841     | 83                            | 807     | 332     |
| 401                      | 8 009                         | 446                         | 1694    | 867     | 46                            | 926     | 371     |
| 402                      | 10 212                        | 681                         | 1494    | 894     | 189                           | 796     | 365     |
| 403                      | 4 148                         | 482                         | 2224    | 880     | 56                            | 1269    | 385     |
| 404                      | 10 257                        | 557                         | 1866    | 861     | 59                            | 1127    | 362     |
| 405                      | 10 161                        | 603                         | 909     | 695     | 98                            | 393     | 233     |
| 406                      | 17 216                        | 595                         | 1146    | 740     | 115                           | 569     | 264     |
| 407                      | 9 574                         | 646                         | 1421    | 824     | 132                           | 766     | 325     |
| 408                      | 11 465                        | 590                         | 1492    | 860     | 86                            | 814     | 357     |
| 409                      | 5 357                         | 592                         | 1022    | 671     | 89                            | 466     | 199     |
| 410                      | 16 220                        | 594                         | 913     | 684     | 88                            | 470     | 204     |
| 411                      | 5 862                         | 594                         | 1218    | 806     | 109                           | 665     | 314     |
| 412                      | 11 805                        | 558                         | 1448    | 907     | 65                            | 878     | 397     |
| 413                      | 7 030                         | 624                         | 1440    | 944     | 185                           | 864     | 450     |
| 414                      | 10 482                        | 639                         | 1034    | 770     | 147                           | 551     | 284     |
| 415                      | 10 985                        | 591                         | 1018    | 725     | 112                           | 454     | 261     |
| 416                      | 7 518                         | 686                         | 1012    | 838     | 216                           | 477     | 362     |
| 501                      | 11 950                        | 690                         | 1652    | 954     | 197                           | 978     | 428     |
| 502                      | 15 952                        | 664                         | 2060    | 992     | 179                           | 1337    | 454     |
| 503                      | 9 988                         | 694                         | 1026    | 769     | 201                           | 470     | 277     |
| 504                      | 11 703                        | 742                         | 2188    | 1029    | 255                           | 1245    | 495     |
| 505                      | 6 671                         | 780                         | 980     | 842     | 278                           | 489     | 352     |
| 506                      | 16 427                        | 796                         | 2282    | 1125    | 285                           | 1441    | 555     |
| 507                      | 7 471                         | 795                         | 1117    | 893     | 262                           | 562     | 386     |
| 508                      | 11 819                        | 766                         | 1038    | 847     | 254                           | 562     | 359     |
| 509                      | 7 961                         | 807                         | 1362    | 973     | 306                           | 814     | 486     |
| 510                      | 16 966                        | 833                         | 1880    | 1177    | 316                           | 1137    | 592     |
| 601                      | 10 583                        | 666                         | 2011    | 1265    | 178                           | 1197    | 667     |
| 602                      | 12 005                        | 769                         | 2221    | 932     | 262                           | 1267    | 410     |
| 603                      | 7 582                         | 784                         | 2261    | 1222    | 289                           | 1292    | 643     |
| 604                      | 9 745                         | 667                         | 1413    | 885     | 184                           | 803     | 375     |
| 605                      | 3 974                         | 563                         | 1217    | 895     | 121                           | 690     | 402     |
| 606                      | 11 888                        | 715                         | 1836    | 1171    | 234                           | 1125    | 607     |
| 607                      | 18 403                        | 564                         | 2067    | 981     | 114                           | 1334    | 488     |
| 608                      | 14 336                        | 676                         | 1435    | 896     | 191                           | 771     | 420     |
| 610                      | 8 249                         | 565                         | 1465    | 854     | 114                           | 894     | 390     |
| 611                      | 3 949                         | 872                         | 1479    | 1134    | 382                           | 899     | 602     |
| 612                      | 8 749                         | 411                         | 2070    | 938     | 46                            | 1295    | 461     |
| 613                      | 12 772                        | 469                         | 2061    | 919     | 50                            | 1338    | 424     |
| 614                      | 4 197                         | 469                         | 1291    | 749     | 46                            | 699     | 294     |
| 615                      | 3 786                         | 894                         | 1920    | 1449    | 364                           | 1183    | 819     |