

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 – 45 Orléans (02) – Tél.: (38) 66.06.60

Évaluation des ressources hydrauliques

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

par

O. DELAROZIÈRE-BOUILLIN



Département HYDROGÉOLOGIE

Service Cartographie-Ressources

B.P. 6009 – 45 Orléans (02) – Tél.: (38) 66.06.60

71 SGN 173 HYD

Janvier 1971

R E S U M E

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle moyennes, calculées pour les principales stations météorologiques du territoire français, par quatre méthodes actuellement à la disposition de l'hydrogéologue (formules mensuelles de THORNTHWAITE, TURC et PENMAN ; formule annuelle de TURC) sont présentées sous forme de cartes permettant une comparaison critique des résultats obtenus.

Cette étude a été réalisée dans le cadre des recherches méthodologiques entreprises par le département d'hydrogéologie (Service Cartographie-Ressources), en marge de l'étude effectuée en 1969 et 1970 pour la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale, en vue de l'évaluation et de la cartographie du débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France (cf. rapports 69 SGL 294 HYD et 70 SGN 299 HYD).

T A B L E

1. INTRODUCTION

2. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

2.1. Méthode de THORNTHWAITE

2.2. Méthode de TURC mensuelle

2.3. Méthode de PENMAN

2.4. Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

3. EVAPOTRANSPIRATION REELLE

3.1. Méthodes de THORNTHWAITE et de TURC mensuelle

3.2. Méthode de TURC annuelle

3.3. Comparaison des différentes méthodes

4. CONCLUSIONS PRATIQUES

1. INTRODUCTION

Le présent rapport a pour objet une étude critique des principales méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle afin d'apprécier, en confrontant les résultats obtenus par leur application à un ensemble de stations du territoire français, les possibilités et les limites de leur emploi en hydrogéologie.

Rappelons que l'utilisation de ces formules de calcul d'ETP ou d'ETR, à partir de données climatiques (température, précipitations, etc...) peut s'envisager, dans le cadre d'études hydrogéologiques régionales :

- soit pour estimer le déficit d'écoulement probable et, par établissement de bilan, l'écoulement probable (de préférence moyen) dans un bassin, lorsque des mesures hydrométriques font défaut. Ces formules constituent en ce cas des "modèles globaux" de bassin simplifiés
- soit pour fournir des "index" du déficit d'écoulement servant à déterminer la distribution spatiale de l'écoulement moyen dans un bassin, lorsque des mesures hydrométriques sont disponibles (recherches d'interpolation, modèles de bassin matriciel) (1).

Sources des informations climatologiques utilisées :

- Atlas climatique de la France. Météorologie nationale 1969
- Résumés mensuels du temps en France. Météorologie nationale
- Archives inédites de la Météorologie nationale communiquées par M.GARNIER

(1) cf. - rapport 69 SGL 294 HYD : Etude sommaire de la distribution des ressources en eau souterraine de la France, rapport n° 1 par O.DELAROZIERE-BOUILLIN et J. MARGAT.

- rapport 71 SGN 085 HYD : Calcul automatique de la distribution spatiale des modules d'écoulement total et d'écoulement souterrain dans un bassin versant. Programme FLØC par O. DELAROZIERE-BOUILLIN, J.P. LABORDE et J. MARGAT.

Avertissement relatif aux cartes présentées

Les cartes illustrant ce rapport sont destinées seulement à permettre une visualisation commode de la distribution géographique des diverses valeurs numériques obtenues en les soulignant par des zonalités.

Compte tenu de leur très petite échelle et du petit nombre de stations utilisées, ces cartes ne sont pas conçues pour opérer des interpolations, ni pour rechercher des valeurs moyennes par planimétrie. Il est donc fortement déconseillé de le tenter. Les courbes construites pour matérialiser les zones groupant des points fournissant des valeurs comprises dans une même classe n'ont pas la signification précise de courbes d'égale valeur.

Des cartographies plus précises dans ce domaine sont concevables, mais elles exigeraient un plus grand nombre de points de mesure des données à utiliser et l'emploi de règles de construction tenant compte de divers index (altitude, caractéristiques morphologiques, état du sol et de la couverture végétale), ainsi que le choix d'échelles significatives.

2. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

2.1. Méthode de THORNTHWAITE

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle selon la méthode de THORNTHWAITE a été effectué pour 55 stations françaises - à partir des valeurs moyennes pour la période 1958-1967 (1) de la température mensuelle - à l'aide du programme de calcul automatique, disponible au département d'hydrogéologie (2). Les valeurs moyennes mensuelles interannuelles ont été utilisées après une étude critique de M. CANCEILL qui a montré que la variabilité intermensuelle des températures n'est pas susceptible d'introduire une erreur importante dans l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle (3). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1, et cartographiés à la figure 2.1.

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculées par la méthode de THORNTHWAITE sont comprises entre 650 et 750 mm/an pour la quasi totalité du territoire français. Les plus fortes valeurs, localisées dans les régions de Perpignan et de Nice, sont de l'ordre de 800 mm/an.

-
- (1) Période de 10 ans utilisée pour l'étude citée plus haut, cf. rapport 70 SGN 299 HYD : étude sommaire de la distribution des ressources en eau souterraine de la France, rapport n° 2 par O. DELAROZIERE-BOUILLIN.
 - (2) cf. rapport 70 SGN 107 HYD : calcul automatique des "bilans d'eau" mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc par M. BONNET, O. DELAROZIERE-BOUILLIN, Cl. JUSSERAND et P. ROUX.
 - (3) Par contre, en ce qui concerne l'évaluation de l'évapotranspiration réelle par établissement d'un "bilan d'eau" à partir des précipitations, M. CANCEILL a montré la nécessité d'utiliser les valeurs mensuelles réelles de chaque année ; l'utilisation de moyennes intermensuelles pouvant introduire des erreurs de l'ordre de 10 à 20 %.

TABLEAU 1

Valeurs moyennes interannuelles (1958-1967) de l'évapotranspiration
potentielle et réelle calculées par les méthodes de TURC (formule
mensuelle) et de THORNTHWAITE

STATIONS	TURC			THORNTHWAITE		
	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT
Dunkerque	590	496	181	654	528	145
Lille	582	492	107	648	507	90
Abbeville	587	538	221	653	566	184
Saint-Quentin	580	516	194	650	546	162
Reims	630	491	94	656	492	92
Romilly-sur-Seine	647	493	119	657	493	125
Auxerre	703	515	99	673	500	110
Château-Chinon	632	607	234	622	579	262
Langres	649	584	351	623	562	372
Nancy	618	529	192			
Metz	629	554	215	650	553	213
Strasbourg	629	515	54	656	511	59

TABLEAU 1 (suite)

STATIONS	TURC			THORNTHWAITE		
	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT
Belfort	645	600	421	635	586	436
Besançon	683	628	445	656	600	474
Dijon	729	567	147	669	539	175
Mâcon	743	619	223	675	582	260
Lyon	765	627	215	695	591	251
Bourg-St. Maurice	644	569	392	607	552	409
Grenoble	759	649	337	675	599	386
Mont-Aigoual	547	513	1910	474	465	1948
Millau	793	588	162	685	542	208
Gourdon	770	671	294	700	617	347
Le Puy	685	553	79	619	531	102
Clermont-Ferrand	713	554	19	671	545	28
Limoges	696	599	349	657	575	374
Nevers	709	607	234	661	579	262
Chateauroux	708	574	212	682	548	237

TABLEAU 1 (suite)

STATIONS	TURC			THORNTHWAITE		
	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT
Tours	699	550	173	679	536	188
Orléans	678	512	146	667	506	152
Chartres	676	476	103	658	478	95
Paris	700	536	131	695	536	128
Beauvais	608	488	163	647	502	144
Rouen	620	510	229	656	523	213
Caen	630	522	249	652	542	226
Cherbourg	659	583	515	669	600	498
Rennes	684	494	148	675	495	145
Brest	645	596	637	651	607	627
Le Mans	663	524	233	677	520	236
Angers	713	486	131	681	478	141
Nantes	718	564	295	689	550	309
Poitiers	742	573	219	680	548	245

TABLEAU 1 (fin)

STATIONS	TURC			THORNTHWAITE		
	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT	ETP année moyenne	ETR moyenne des années réelles 1958- 1967 - calculs effectués avec ETP (année moyenne)	EXCEDENT
Cognac	778	590	221	712	563	248
La Rochelle	783	584	253	715	566	271
Bordeaux	789	627	358	705	590	395
Agen	791	620	152	714	583	189
Mont-de-Marsan	771	630	303	717	590	344
Biarritz	800	755	784	722	684	855
Pau	761	691	438	700	635	494
Toulouse	811	571	86	715	527	130
Perpignan	1010	496	180	809	444	233
Montpellier	984	538	161	753	478	234
Montélimar	916	650	300	735	576	374
Marignane	1022	464	74	770	419	117
Toulon	1080	539	135	796	471	202
Nice	1025	588	284	783	498	374

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE- MOYENNE ANNUELLE 1958-1967
CALCULEE PAR LA FORMULE DE THORNTHWAITE



Fig. 2.1

2.2. Méthode de TURC mensuelle

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle selon la méthode de TURC mensuelle a été effectué pour les 55 stations précédemment utilisées (1) - à partir des valeurs moyennes pour la même période 1958-1967 de la température et de la durée d'insolation mensuelles - à l'aide du programme de calcul automatique, disponible au département d'hydrogéologie (2).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1 et cartographiés à la figure 2.2.

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées par la formule de TURC mensuelle sont dans l'ensemble comprises entre 600 et 800 mm/an. Des valeurs beaucoup plus fortes 800 à 1100 mm/an caractérisent les régions méditerranéennes.

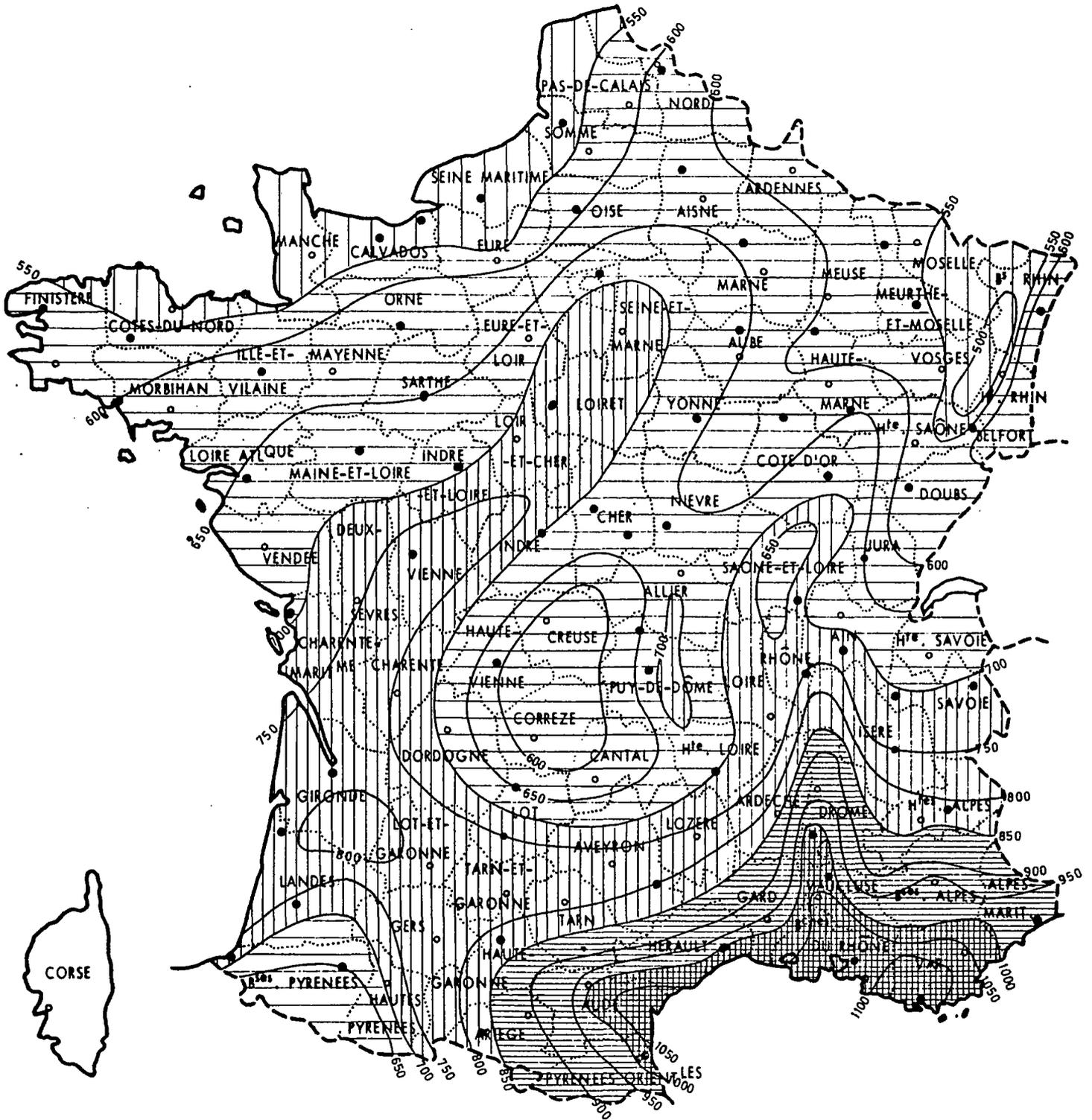
2.3. Méthode de PENMAN

La figure 2.3. présente une carte de l'évapotranspiration potentielle - moyenne annuelle 1946-1960 - calculée par la formule de PENMAN. Cette carte est extraite de l'Atlas climatique de la France, publié en 1969 par la Météorologie nationale. Dans la majeure partie du territoire l'évapotranspiration potentielle est comprise entre 600 et 800 mm/an ; elle atteint 800 à 1100 mm/an pour les régions méditerranéennes.

(1) voir 2.1.

(2) cf. rapport 70 SGN 107 HYD déjà cité

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE - MOYENNE ANNUELLE 1946-1960 CALCULEE PAR LA FORMULE DE PENMAN. Météorologie Nationale - Atlas climatique de la France 1969



HAUTEUR D'EAU en m/m



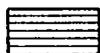
de 400 à 550



de 550 à 700



de 700 à 850



de 850 à 1000



de 1000 à 1150

Fig.2.3

2.4. Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

L'examen des cartes de distribution des valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculées par les différentes méthodes montre une grande ressemblance entre les résultats des méthodes de TURC mensuelle et de PENMAN, pour la France. La méthode de THORNTHWAITE dans la moitié nord de la France donne des résultats se rapprochant de ceux obtenus par les deux autres méthodes ; par contre dans le Sud de la France, elle fournit des valeurs de l'évapotranspiration potentielle nettement inférieures. Ce fait est illustré par le graphique de la figure 2.4. sur lequel ont été portées, en fonction de la latitude, les différences entre l'évapotranspiration potentielle annuelle calculée par la méthode de THORNTHWAITE et celle calculée par la méthode de TURC mensuelle. On observe que les écarts augmentent en fonction inverse de la latitude. En admettant une marge d'erreur de l'ordre de 10 %, on peut utiliser indifféremment la méthode de THORNTHWAITE ou celle de TURC mensuelle de 50° N à 47° N de latitude. Pour des latitudes inférieures à 47° N, l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode devra être discutée.

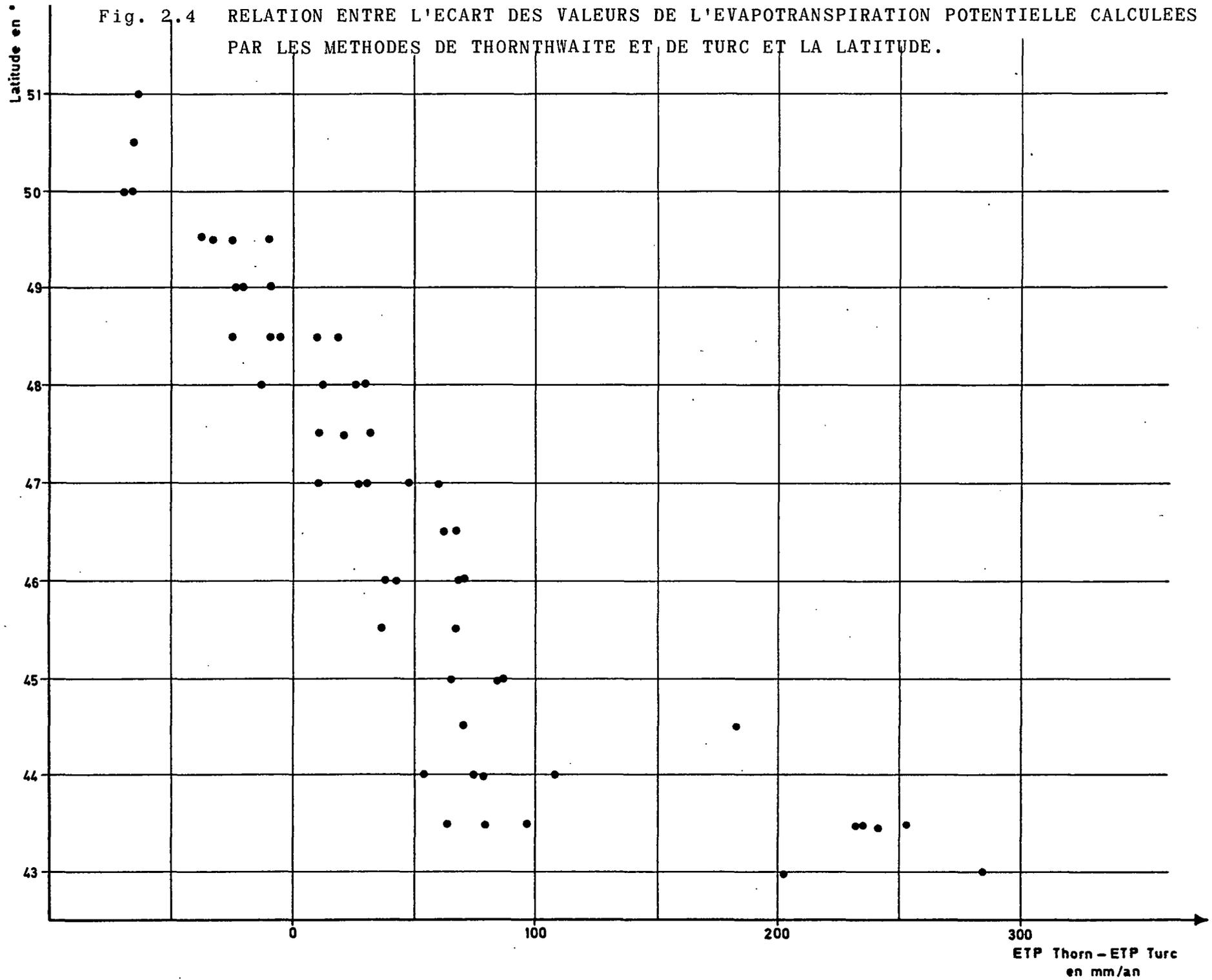
3. EVAPOTRANSPIRATION REELLE

3.1. Méthodes de THORNTHWAITE et de TURC mensuelle

A partir des valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle obtenues ci-dessus par les méthodes de THORNTHWAITE (voir § 2.1.) et de TURC (voir § 2.2.), des bilans d'eau mensuels et annuels ont été calculés en tenant compte des précipitations des mois réels de la période 1958-1967 mesurées aux mêmes stations (1). La réserve en eau du sol a été fixée, selon la convention de ces méthodes, pour tout le territoire à 100 mm.

(1) Les valeurs des hauteurs annuelles de précipitation correspondantes ont été données dans le rapport 70 SGN 299 HYD déjà cité.

Fig. 2.4 RELATION ENTRE L'ECART DES VALEURS DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE CALCULEES PAR LES METHODES DE THORNTHWAITE ET DE TURC ET LA LATITUDE.



Les valeurs de l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle et de l'excédent (1) obtenues sont présentées dans le tableau 1. Les cartes des figures 3.1.1. (méthode de THORNTHWAITE) et 3.1.2. (méthode de TURC) montrent la distribution des valeurs de l'évapotranspiration réelle.

Pour la majeure partie du territoire, l'évapotranspiration réelle calculée est comprise entre 500 et 600 mm/an.

3.2. Méthode de TURC annuelle

La figure 3.2. reproduit la carte de l'évapotranspiration réelle moyenne en France, calculée par la formule annuelle statistique de TURC (période 1891-1930), établie par S.COTTEZ (cf.rapport BRGM 69 SGL 170 HYD).

Pour la plus grande partie du territoire, l'évapotranspiration réelle calculée est voisine de 500 mm/an ; les valeurs extrêmes varient entre 400 et 650 mm/an.

3.3. Comparaison des différentes méthodes

La comparaison des cartes des valeurs annuelles de l'évapotranspiration réelle obtenues par les méthodes de THORNTHWAITE (voir fig. 3.1.1.) et de TURC mensuelle (voir fig.3.1.2.) traduit, compte tenu d'un lissage important, les mêmes différences que la comparaison des cartes des valeurs annuelles de l'évapotranspiration potentielle obtenues par ces deux méthodes.

(1) Différence mensuelle entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle calculée, compte tenu du jeu de la réserve en eau utile, assimilable à la hauteur d'eau théoriquement disponible pour l'écoulement total (ruissellement et infiltration).

EVAPOTRANSPIRATION REELLE - MOYENNE ANNUELLE 1958-1967 CALCULEE
PAR LA FORMULE DE TURC



Fig.3.1-2

EVAPOTRANSPIRATION REELLE MOYENNE EN FRANCE CALCULEE PAR LA FORMULE ANNUELLE DE TURC (Période 1891 - 1930)

S.COTTEZ- Rapport B.R.G.M. 69 SGL 170 HYD.(Utilisation en hydrogéologie de la formule annuelle de TURC).

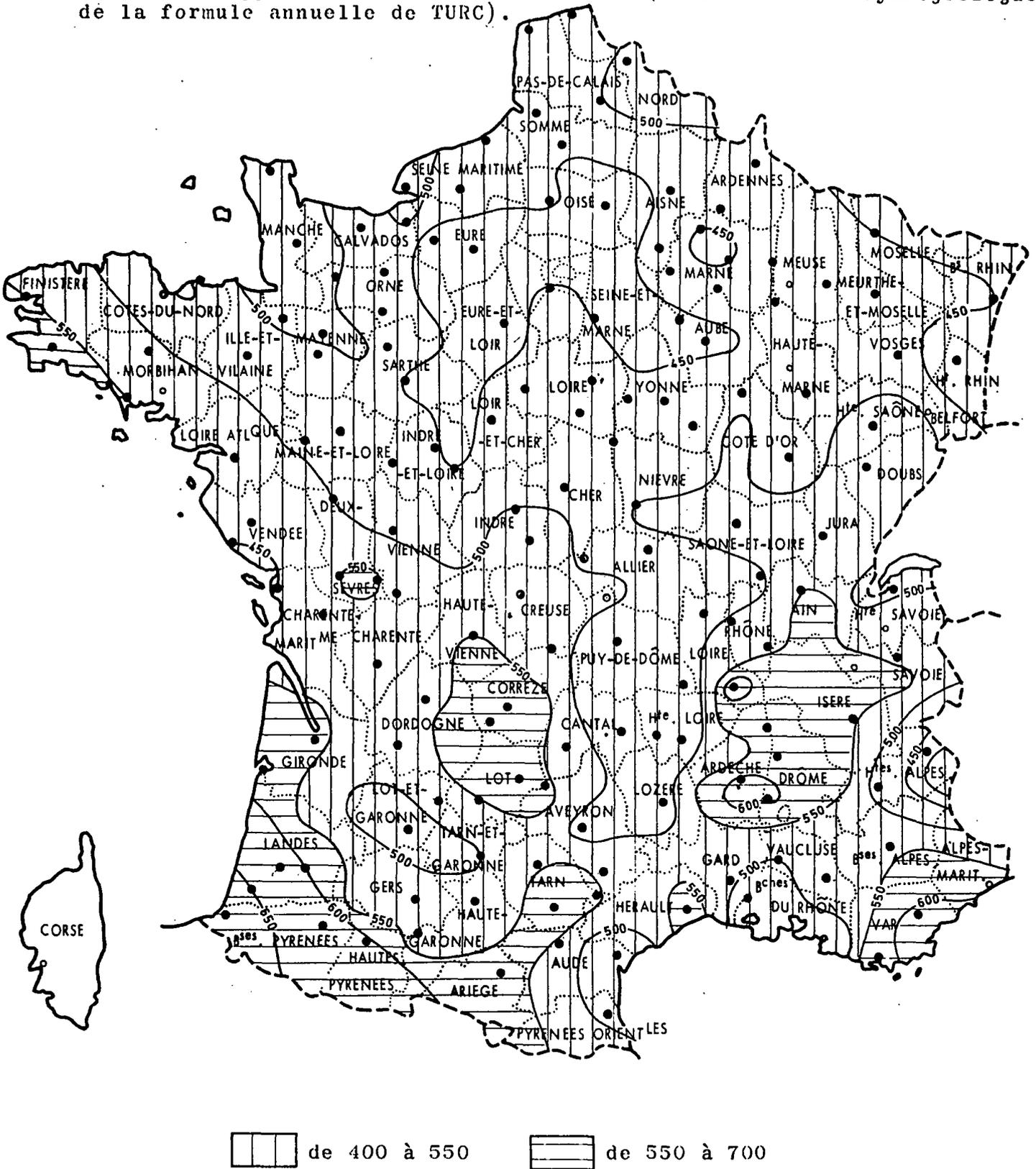


Fig.3.2

Pour toute la partie nord du territoire, l'utilisation de l'une ou l'autre formule est indifférente, dans la partie sud on observe une différence de l'ordre de 50 mm entre les valeurs obtenues par la méthode de THORNTHWAITE (valeurs inférieures) et celles obtenues par la méthode de TURC mensuelle (valeurs supérieures).

L'expérience montre que dans les régions méridionales la méthode de THORNTHWAITE sous-estime l'évapotranspiration potentielle donc l'évapotranspiration réelle. Ce fait a conduit certains auteurs à conseiller le choix d'une valeur supérieure à 100 mm pour la réserve en eau du sol : 150 mm le plus souvent, quelquefois 200 mm.

Ceci peut sembler être un moyen de "corriger" les résultats obtenus par la méthode de THORNTHWAITE, mais il serait moins illusoire d'ajouter arbitrairement 50 ou 100 mm à la valeur annuelle de l'évapotranspiration réelle calculée. En effet, cette "correction" fausse les valeurs mensuelles de ETR, de l'excédent et du déficit qui ne peuvent en aucun cas être utilisées.

Lorsque l'on dispose des données nécessaires du calcul par la méthode de TURC mensuelle (valeurs mensuelles de la durée d'insolation et de l'humidité relative) il est préférable d'utiliser cette méthode.

La comparaison des cartes obtenues par les méthodes de THORNTHWAITE (voir fig. 3.1.1.) et de TURC mensuelle (voir fig. 3.1.2.) et par la formule de TURC annuelle (voir fig. 3.2.), fait apparaître un écart systématique de l'ordre de 50 à 100 mm/an : la formule de TURC annuelle donne des valeurs trop faibles de l'évapotranspiration réelle pour pouvoir être utilisée dans l'établissement de bilans hydrologiques détaillés.

4. CONCLUSIONS PRATIQUES

- L'utilisation de la formule de TURC annuelle est à éviter pour l'établissement de bilans hydrologiques.
- Au Nord du 47^e parallèle de latitude nord, l'utilisation des formules de THORNTHWAITE ou de TURC mensuelle donne des résultats semblables.
- Au Sud du 47^e parallèle de latitude nord, il est préférable d'utiliser la formule de TURC mensuelle. Si l'on ne dispose pas de toutes les données nécessaires à l'application de la formule de TURC mensuelle on peut, à condition de ne s'intéresser qu'aux valeurs annuelles de l'évapotranspiration réelle et de l'excédent, utiliser la formule de THORNTHWAITE en majorant de 50 à 100 mm la valeur de l'évapotranspiration réelle calculée.

Les tableaux de calcul (listing) de l'évapotranspiration potentielle et réelle (méthodes de THORNTHWAITE et de TURC mensuelle) pour les stations utilisées sont consultables au département d'hydrogéologie, auquel des demandes de reproduction peuvent également être adressées*.

* Joindre en ce cas un n° d'imputation pour les Arts graphiques.