

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

Direction des Ressources en Eau et en Sol

Division des Sols



APPROCHE DE L'INTENSITE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE
DES ACCUMULATIONS GYPSEUSES DANS LES SOLS AU
MOYEN DU DOSAGE DE LA TENEUR EN TRITIUM DE L'EAU
DE CONSTITUTION DU GYPSE

E-S 181



J. VIEILLEFON, Pédologue ORSTOM

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Division des Sols en Tunisie



Décembre 1980

APPROCHE DE L'INTENSITE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DES ACCUMULATIONS
GYPSEUSES DANS LES SOLS AU MOYEN DU DOSAGE DE LA TENEUR EN TRITIUM DE
L'EAU DE CONSTITUTION DU GYPSE

par
J. VIEILLEFON

Décembre 1980

APPROCHE DE L'INTENSITE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DES ACCUMULATIONS
GYPSEUSES DANS LES SOLS AU MOYEN DU DOSAGE DE LA TENEUR EN TRITIUM
DE L'EAU DE CONSTITUTION DU GYPSE

- Avant - Propos -

I - Etude de quelques mécanismes d'échange de l'eau de constitution du gypse -

- A . Mode opératoire
- B . Résultats et discussions
 - 1) Echanges solide-liquide
 - 2) Déshydratation-Réhydratation
 - 3) Dissolution-Reprécipitation.
 - a. Données de comptage
 - b. Vérification
- C . Conclusions

II - Application aux échantillons naturels. Estimation de la dynamique des encroûtements gypseux -

- A . Aperçu sur les variations du tritium dans les précipitations
- B . Essai de modélisation de l'évolution de la teneur en tritium de l'eau de constitution au cours de la mise en place des accumulations gypseuses et de leur évolution récente.
 - 1) Evolution d'une croûte récente
 - 2) Formation et évolution d'un encroûtement de nappe
 - 3) Synthèse
- C . Résultats obtenus sur les échantillons naturels
 - 1) Accumulations de surface
 - 2) Accumulations de nappe
- D . Discussion et conclusions

Bibliographie.

APPROCHE DE L'INTENSITE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE
DES ACCUMULATIONS GYPSEUSES DANS LES SOLS AU MOYEN DU DOSAGE DE LA
TENEUR EN TRITIUM DE L'EAU DE CONSTITUTION DU GYPSE

J. VIEILLEFON
Pédologue à la Mission ORSTOM en Tunisie

AVANT - PROPOS

Le tritium (H^3), isotope radioactif lourd de l'hydrogène, dont les explosions thermonucléaires aériennes ont considérablement augmenté la teneur dans l'atmosphère, puis, par voie de conséquence, dans les précipitations, s'est révélé un traceur très utile dans les recherches hydrogéologiques, ainsi que dans celles qui concernent le ruissellement, l'infiltration, etc... (cf. OLIVE 1970, FONTES 1976, BLAVOX 1978).

Il nous a semblé intéressant d'en suivre également les variations dans les minéraux hydratés, notamment le gypse, qui est le matériau prédominant de nombreux sols des régions arides, notamment en Tunisie où les roches gypseuses abondent.

En effet de vastes étendues de collines du Sud Tunisien sont couvertes d'accumulations gypseuses, dites "de surface", croûtes dures et encroûtements friables, très riches en gypse, s'étendant sur près de un million d'hectares (VIEILLEFON 1976), tandis que la plupart des sols alluviaux de ces régions voient se développer, au contact de la nappe phréatique naturelle ou causée par l'irrigation, d'importantes accumulations souterraines, appelées "croûtes de nappe" (364.000 hectares, VIEILLEFON op. cité).

Les moyens classiques d'investigation ne permettent pas toujours de déterminer l'ancienneté de ces accumulations, ni de conclure à la présence ou l'absence d'une dynamique actuelle en leur sein.

C'est donc par l'analyse de l'eau de constitution du gypse, dont on rappellera la formule, $SO_4Ca, 2H_2O$, et notamment par le dosage de sa teneur en tritium, que l'on tentera d'apporter des réponses à ces questions.

Après avoir étudié, par quelques expériences, les mécanismes de l'échange isotopique hydrogène/tritium pouvant survenir au sein du milieu gypseux, on essaiera d'expliquer les teneurs observées dans les échantillons naturels représentatifs des différents types d'accumulation observés dans les sols par des modèles dynamiques appropriés.

- I - Etude de quelques mécanismes d'échange de l'eau de constitution du gypse

Parmi les caractéristiques du minéral gypse, outre sa solubilité moyenne, variable avec la teneur en ions autres que SO_4 et Ca dans les solutions, de 2 à 7 gr/l environ, on note sa facilité de déshydratation partielle à température relativement faible, autour de 80° à la pression atmosphérique (VIEILLEFON 1979).

Il semblait donc que ce soit à ces deux mécanismes principaux, solubilisation/reprécipitation et déshydratation/réhydratation, que l'on pourrait attribuer des possibilités d'échange de l'eau de constitution avec celle du milieu liquide. Des expériences ont donc été réalisées sur ces deux mécanismes. Cependant il fallait s'assurer tout d'abord (FONTES, communication orale), qu'il n'existait pas également des possibilités d'échange entre le minéral cristallisé conservant son intégrité et l'eau des solutions en contact avec lui. Une première série d'expériences a donc été entreprise en ce sens.

. A . Mode opératoire.

Dans les trois expériences on a utilisé des échantillons homogénéisés provenant d'un sol gypseux à encroûtement de surface déjà utilisé pour des recherches analytiques (VIEILLEFON 1977, 1978, 1979), prélevé sur les pentes du Djebel Dissa, près de Gabès.

- 1) Dans une première série d'expérience 100 g d'échantillon ont été agités avec 1 litre d'eau saturée en gypse à 100 UT (unité tritium) (1 UT = 1 atome H^3 pour 10^{18} atomes H^1) pendant 1 à 4 semaines. Après filtration le résidu a été séché à 60° en étuve ventilée pour retirer l'eau d'imbibition sans altérer l'eau de constitution (VIEILLEFON 1979).
- 2) Une seconde série a été soumise à des cycles successifs de déshydratation et de réhydratation : après avoir été partiellement déshydratés par étuvage à 105° pendant 3 heures puis réhydratés à l'air humide jusqu'au stade semi-hydraté ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$), ils ont été réhydratés jusqu'au stade gypse par la même eau à 100 UT, et enfin séchés à 60° .

3) La troisième série a été soumise aux traitements suivants :

- agitation plusieurs heures de 100 g de sol gypseux, contenant environ 90% de gypse avec de l'eau tritiée, dans les proportions suivantes :

1 et 5 l : eau contenant 76737 ± 107 UT

10, 20 et 40 l : eau contenant 744 ± 14 UT

- évaporation des solutions à l'air libre, d'abord par exposition au soleil, puis sous courant d'air chaud et achèvement en étuve ventilée à 60° pour aller à sec.

4) On a procédé ensuite à l'extraction de l'eau de constitution de la totalité de chaque échantillon dans une chaîne d'extraction comprenant 1 ballon chauffé à $300-400^\circ$, un réfrigérant ascendant et un ballon de réception plongé dans un mélange réfrigérant acétone-neige carbonique, et raccordé à une trompe à vide. Le vide partiel est appliqué avant le chauffage.

5) Enfin le comptage du tritium a été effectué par scintillation liquide au laboratoire du C.R.G. de THONON.

. B . Résultats et discussion.

1) Echanges solide-liquide.

Les 4 échantillons de durée d'agitation croissante se sont révélés posséder la même teneur en tritium, soit 27 ± 9 UT, une valeur très proche de celle du témoin du même prélèvement analysé l'année précédente, 30 ± 3 UT (ce qui, compte-tenu de la décroissance radioactive, ferait 28 pour la même année que les autres).

Nous ne constatons donc pas d'échange entre l'eau de constitution et la solution. Notons qu'il en serait de même entre la solution du sol et l'eau interstitielle des argiles (OLIVE 1970).

Ce résultat infirme donc l'hypothèse soutenue par SOFER (1978, qui aurait décelé de tels échanges pour ce qui concerne l'oxygène 18 et le deutérium.

2) Déshydratation - Réhydratation.

L'hypothèse de départ était que si l'on enlève les trois-quarts de l'eau de constitution du gypse pour la remplacer ensuite par de l'eau marquée, on devrait observer, en répétant plusieurs fois l'opération, un remplacement progressif de la totalité de l'eau de constitution par l'eau tritiée, soit, sachant que les échantillons utilisés

avaient une teneur initiale de 30 UT, et que l'eau marquée utilisée pour la réhydratation au stade gypse contenait 100 UT, on aurait dû observer pour 4 cycles successifs, respectivement 82 puis 94 puis 99 et enfin 100 UT.

Les résultats obtenus, avec deux répétitions par échantillon, sont assez différents :

1er cycle	90 et 100 UT
2ème "	114 et 114 UT
3ème "	119 et 78 UT
4ème "	100 et 84 UT.

Plusieurs causes peuvent expliquer ces différences :

- procédure et rendement de l'extraction : si des pertes possibles dans la procédure par circulation d'air peuvent être plus ou moins évitées par piégeage sous-vide, ce qui n'est pas parfaitement démontré, c'est surtout un rendement mauvais, l'échantillon n'allant pas complètement "à sec", qui est la cause principale des faibles teneurs, l'évaporation concentrant le tritium, bien qu'il n'y ait pas de différence de poids avec l'hydrogène.

Effectivement les teneurs de 78, 84 et 90 UT correspondent à des rendements d'extraction insuffisants.

- technique de déshydratation : les échantillons étaient séchés à l'étuve à 105° pendant 3 heures pour dépasser le stade de l'hémihydrate, puis réhydratés à l'air humide ; la vapeur d'eau de réhydratation jusqu'au stade semi-hydrate pouvait être plus ou moins riche en tritium ; par ailleurs on n'en mesurait pas la quantité.

Ces raisons font qu'il semble impossible, par cette méthode, d'étudier la cinétique de réhydratation. Il reste que le marquage de l'eau de constitution par le tritium est un phénomène rapide au cours des cycles de déshydratation-réhydratation.

3 Dissolution - Reprécipitation.

a) - Données de comptage

Ech.	1	2	3	4	5	6
Témoin		100g/ 1	100g/5 1	100g/10 1	100g/20 1	100g/40 1
	14 à 27 UT	1705 ± 19	6377 ± 32	165 ± 11	331 ± 12	23 ± 11

Les comptages réalisés sur l'échantillon témoin et sur les échantillons d'expérience montrent clairement l'influence des phénomènes de dissolution-reprécipitation sur la modification de la teneur en tritium de l'eau de constitution. Il y a bien remplacement d'une partie, plus ou moins importante suivant le rapport de dilution utilisé, de l'eau de constitution initiale. Tous les échantillons dissous voient leur teneur en tritium augmenter dans des proportions sans commune mesure avec les erreurs d'analyse. On notera qu'il n'a pas été nécessaire de prendre en compte un éventuel fractionnement isotopique au cours de l'évaporation des solutions, puisque l'eau de la totalité des échantillons est ensuite extraite pour l'analyse.

On remarquera, si l'on compare les échantillons 4 et 5 (100 g dans respectivement 10 et 20 l de la même solution) que leurs teneurs en tritium sont dans l'exact rapport des dilutions ($165/331 = 1/2$). Avec 20 litres on a dissous exactement deux fois plus de gypse qu'avec 10.

De même en comparant les résultats obtenus pour les échantillons 2 et 4, on constate que leur rapport : $1705/165 = 10,33$, est égal à celui des dilutions, compte-tenu de la teneur différente des eaux, soit $76737/10 \times 744 = 10,31$.

Nous pouvons donc en conclure que le remplacement de l'eau de constitution par l'eau de la solution est bien un phénomène quantitatif.

Cependant les résultats obtenus pour les échantillons 3 et 6 surtout ne sont pas en accord avec les précédents. Pour le 3, une fuite a été constatée au moment de l'extraction et une partie de l'eau vraisemblablement enrichie en tritium de la fin de distillation a pu être perdue. Pour le 6, la raison la plus plausible est que l'agitation n'a pas été assez efficace et qu'une partie seulement du gypse qui aurait pu être dissous l'a été. On verra par la suite qu'il est d'ailleurs possible d'estimer la quantité effectivement dissoute.

b) - Vérification

Pour vérifier l'exactitude de l'hypothèse avancée précédemment, on peut tenter de calculer les valeurs théoriques qu'auraient dû prendre les teneurs des divers traitements, connaissant la valeur du témoin et celles des eaux utilisées et leurs proportions.

Mais il est alors nécessaire de faire une hypothèse sur la solubilité du gypse employé. Les données de la littérature indiquent une valeur de 2, 3 g / litre en l'absence d'ions autres que SO_4 et Ca. Les calculs effectués en prenant cette valeur ont donné des valeurs nettement plus élevées que les mesures, alors qu'avec 2 g / litre, valeur moyenne adoptée ensuite, les valeurs sont en bon accord dans les 3 cas cités ci-avant.

Le calcul est mené comme suit :

- on suppose que chaque échantillon de 100 g contient 90 g de gypse (les teneurs réelles, estimées d'après le rendement de l'extraction, donc d'après la perte de poids, s'échelonnent en fait de 89,7 à 93,2 %) ; lors de la dissolution d'une fraction plus ou moins importante, l'eau de constitution de cette fraction, marquée, comme le témoin, par un faible taux de tritium, se mélange à l'eau de la solution :

Ainsi pour l'échantillon à 100 g / litre on aura

$$1000 \text{ cc à } 76844 / 76630 + 2 \times \frac{36}{172} \text{ cc à } 27/14 \text{ UT.}$$

ce qui produit par mélange une solution de 1000,4 cc dont la teneur en tritium sera estimée entre 76813 et 76599.

Cette eau servira à la précipitation de 2 grammes de gypse, qui mélangé au reste de l'échantillon non dissout, aura une teneur moyenne en tritium de l'eau de constitution variant entre 1733 et 1715, soit 1724 ± 9 UT, à comparer aux 1705 ± 19 mesurés.

Le même calcul appliqué aux autres échantillons a fourni respectivement :

pour l'échantillon 100 g / 5 l : 8543 ± 18 contre 6377 ± 32
100 g / 10 l : 181 ± 8 contre 165 ± 11
100 g / 20 l : 342 ± 10 contre 331 ± 12
100 g / 40 l : 663 ± 13 contre 230 ± 11

S'étant ainsi assuré du rendement de l'opération, il devient possible d'estimer la quantité effectivement dissoute dans chaque traitement.

On utilise la même équation que précédemment, mais l'inconnue est alors la solubilité en g/l :

pour l'échantillon 1 on aura :

$$\frac{X \times 76706 \text{ UF} + (90 - X) \cdot 20 \text{ UF}}{90} = 1705$$

d'où $X = 1,98 \text{ g/l}$.

On trouve ainsi des valeurs très voisines, 1,80 à 1,93 g / l, pour les échantillons 4 et 5, mais bien sûr des valeurs moindres pour le 2 et le 6, dont 26 g seulement, sur les 80 escomptés, ont été réellement solubilisées.

. C . Conclusions

L'échange isotopique avec l'eau circulant dans le milieu gypseux ne semble pouvoir se réaliser que par l'intermédiaire des mécanismes de déshydratation-réhydratation et dissolution-reprécipitation.

Le premier de ces mécanismes, outre que son occurrence, même dans les régions les plus chaudes du Sud-Tunisien, semble peu probable, ainsi que des mesures de température sur le terrain l'ont montré, serait en fait responsable d'un remplacement quasi-total de l'eau de constitution du gypse par l'eau servant à la réhydratation. On verra plus loin que les mesures réalisées sur des échantillons naturels variés ne rendent pas compte d'un tel phénomène.

La dissolution du gypse, et l'échange de son eau de constitution avec l'eau de la solution qui le dissout, sont des phénomènes quantitativement liés, quelle que soit la proportion dissoute.

La comparaison d'échantillons d'horizons d'un même profil ou de profils différents (horizons homologues), à un moment donné, permet, s'ils sont soumis aux mêmes sources d'eau, eau météorique ou eau de nappe, par ailleurs plus ou moins liées entre elles, de différencier leur dynamique actuelle, compte-tenu de la décroissance radioactive du tritium et des teneurs mesurées dans les précipitations depuis les grands essais nucléaires dans l'atmosphère.

Il devient peut-être possible d'estimer, dans un échantillon naturel, la part du minéral qui a effectivement subi des phénomènes de dissolution-reprécipitation récents.

D'un point de vue général, il peut être possible d'appliquer un modèle de réservoir de nappe, au stock de gypse avec son eau de constitution. Ceci n'est valable que si la quantité de gypse ne change pas.

La solubilité est un facteur direct du coefficient de recharge, et un âge moyen, ou un temps de résidence devraient pouvoir être calculés.

II - Application aux échantillons naturels. Estimation de la dynamique des encroûtements gypseux dans les sols.

. A . Aperçu sur les variations du tritium dans les précipitations. (Réf. OLIVE 1970; BLAUX 1978).

Les discussions étant basées sur les variations des teneurs en tritium de l'eau de constitution du gypse, dont la valeur est tributaire, à la fois de la décroissance de ce radioélément de période d'environ 12 ans, à la fois d'éventuels échanges avec des eaux météoriques ou souterraines, il est essentiel de connaître les variations de teneur dans l'atmosphère au cours des années, puisque celles-ci se retrouveront, au moins en partie, dans les eaux de percolation des sols.

OLIVE (1970) distingue 5 périodes :

- avant 1953 : production de tritium naturel : environ 15 UT dans les précipitations
- 1953-1958 : quelques essais atomiques dans l'atmosphère font monter la teneur à quelques centaines d'UT
- 1958-1961 : arrêt momentané des essais qui provoque une descente lente jusqu'aux environs de 100 UT
- 1963 : plusieurs explosions très importantes donnant un maximum (en 1963) à Thonon de 6300 UT dans une pluie ; on estime cependant que dans le Bassin Méditerranéen une teneur moyenne de 1500 UT serait représentative de la période
- 1964-1966 : chute progressive de 1000 à 150 UT
- 1967-1970 : quelques explosions de moyenne puissance maintenant une teneur variant de 100 à 150 UT.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de mesures ayant été effectuées à Gabès, ni autre part en Tunisie. C'est pourquoi, dans une première approche, nous retiendrons les chiffres mesurés de l'autre côté de la Méditerranée, qui sont certainement assez voisins. Ces teneurs sont placées dans le tableau ci-dessous, en regard du total pluviométrique annuel, observé à Gabès, de 1953 à 1979.

PLUVIOMETRIE ET TENEUR EN U.T. SUPPOSEE DE LA PLUIE A GABES (1953-1979)

Année	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1969	1961
P mm	232,2	196,1	64,3	189,6	230,3	106,6	336,6	176,1	81,3
UT	25	300	35	100	125	300	450	145	219

Année	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
P mm	232,8	263,7	242,8	257,4	147,7	198,1	122,8	326,9	122,2
UT	238	2907	1496	595	247	213	217	206	189

Année	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
P mm	219,3	199,9	321,0	189,6	411,7	352,4	205,9	218,1	140,9
UT	227	144	126	113	171	117	100 ⁺	100 ⁺	100 ⁺

+ = estimé

Les teneurs en U.T. sont extrapolées de Thonon (France) et VALENCIA (Esp.)

. B . Essai de modélisation de l'évolution de la teneur en tritium de l'eau de constitution au cours de la mise en place des accumulations gypseuses et de leur évolution récente.

Nous n'entrerons pas ici dans l'étude des mécanismes de la mise en place des accumulations gypseuses sur l'origine desquelles les discussions sont passionnées (VIEILLEFON 1976). Nous examinerons seulement ce qui peut se passer au sein d'une accumulation de surface en place, soumise aux aléas climatiques actuels, et lors de la formation d'une accumulation de nappe.

Il convient en effet de considérer deux cas :

- celui des encroûtements de surface, sans communication avec une nappe et seulement soumis à l'infiltration d'eau pluviale, et où le renouvellement d'une partie de l'eau de constitution semble seul possible,
- celui des encroûtements de nappe, susceptibles de s'enrichir chaque année par l'intermédiaire de la nappe, elle-même alimentée par les précipitations.

1 °) Premier cas : évolution d'une croûte de surface

Connaissant les variations des teneurs dans les précipitations en un lieu donné, il serait facile de déterminer la date de la formation d'un dépôt gypseux, si celui-ci était, aussitôt après sa formation, soustrait à toute dissolution ultérieure par des eaux de teneurs différentes. Comme ce ne peut être qu'exceptionnellement le cas, il faut considérer que même si le climat et la position de l'échantillon de gypse ne varient pas au cours de la période, une fraction sera régulièrement dissoute par les précipitations et l'infiltration et conduira à la formation d'un mélange d'eaux de teneurs diverses qui subiront toutes la loi de décroissance exponentielle de leur teneur en tritium.

En fait deux éléments vont varier, d'une part le volume des précipitations susceptibles de produire une dissolution partielle du gypse, d'autre part la teneur en tritium de ces eaux qui, indépendamment des variations dues aux explosions, subit des variations saisonnières que l'on peut qualifier de "météorologiques".

Il existe un troisième élément, qui lui est une caractéristique propre du gypse, c'est sa solubilité, qui va commander les possibilités de dissolution partielle.

Pour simplifier, prenons un monolithe de sol gypseux de 1 m^2 de surface sur lequel tombent 150 mm de pluie (moyenne modale de la région de Gabès dans le Sud Tunisien). Ces 150 litres d'eau pourront dissoudre, à raison de 2 g / l environ, 300 g de gypse qui se reprécipitera, vraisemblablement au sein de la masse, lors des phases de dessèchement.

Considérons que cette pluie annuelle, dont une grande partie va se réévaporer, n'humecte pas plus de 50 cm de sol en profondeur (FERSI - ZANTE 1979). Le volume affecté correspondra à environ 630 kg de gypse * dont seulement 0,3/630, soit 0,05 % seront dissouts et reprécipités. Il faudrait donc 2000 ans pour renouveler théoriquement l'ensemble.

Cependant rien ne prouve que la totalité de la masse humectée soit susceptible d'être progressivement dissoute. Il est probable, au contraire, que ce soient toujours les mêmes portions de la masse de gypse, notamment en surface ou sur les faces des agrégats, là où l'eau circule préférentiellement, que le phénomène puisse jouer.

Prenons aussi un échantillon de croûte gypseuse de surface, d'épaisseur moyenne 5 cm, qui a été analysé, et a donné, en 1980, 29 U T. La dissolution possible portera alors sur une fraction 10 fois plus forte, soit 0,5 %, ce qui nécessite encore 200 ans pour un renouvellement complet de l'eau. Mais finalement il importe peu que une partie seulement de cette croûte ait été renouvelée chaque année puisque le comptage se fait sur l'ensemble.

Considérons donc que cette couche de 5 cm d'épaisseur à vu chaque année, 0,5 % de son eau de constitution "échangée" avec l'eau des précipitations. Puisque nous nous plaçons en 1980, le phénomène à étudier aurait commencé en 1780. Si, de 1780 à 1952 (première période d'OLIVE) la teneur moyenne a été de 15 UT dans les précipitations, différents modes de calcul nous montrent que, compte tenu de la décroissance, la teneur de la croûte n'aurait pas dépassé 1,5 UT en 1952.

* $50 \text{ cm} \times 10.000 \text{ cm}^2 \times 1,4 \times 90/100 = 630$

En effet les 200 parts de l'échantillon, successivement "échangées" de l'année 1 à l'année 200 comportent en effet :
 une part à 15 UT dont la décroissance a duré 199 ans,
 une part à 15 UT dont la décroissance a duré 198 ans, etc...

une part à 15 UT dont la décroissance a duré 1 an ;
 au bout de 200 ans la valeur de l'échantillon peut se calculer comme

$$\sum_0^{199} \frac{15 \cdot 0,95^n}{250} = 15 \frac{1 - 0,95^{199}}{1 - 0,95} = 1,49 \text{ UT}$$

Donc en 1953, quand survient sur ce sol une eau que nous supposons par exemple contenir environ 200 UT, 0,5 % du minéral verra son eau de constitution passer de 1,5 à 200 UT, ce qui donnera pour le mélange

$$\frac{99,5 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot 200}{100} = 2,5 \text{ UT}$$

En répétant ce calcul pour les années suivantes jusqu'en 1980 on constate une progression d'environ 0,5 à 1 UT par an jusqu'en 1961, d'environ 5 UT de 1962 à 1964, puis une descente jusqu'à environ 15 à 16 UT en 1980.

Si le même calcul est effectué, non plus en considérant la pluie moyenne interannuelle, ou plus exactement le "mode probable", qui est en réalité légèrement supérieur à 150 mm, mais les pluviométries réelles, on aboutit à un résultat un peu supérieur, voisin de 26 UT en 1980 (figure 1). En effet il se trouve que les années à forte teneur probable en tritium (1962, 1963 et 1964) sont également excédentaires, ce qui accentue le "poids" des retombées sur les échanges isotopiques*.

Ce résultat est cependant sensiblement du même ordre de grandeur que celui du calcul simplifié précédent.

* Le taux de renouvellement est calculé comme :

$$\frac{P_{\text{mm}} \times 2 \text{ g / l} \times 100}{63 \times 1000} = \frac{P}{35} \%$$

Evolution théorique de la teneur en tritium de l'eau de constitution d'une croûte de 5 cm (renouvellement proportionnel à la pluie, densité 1.4)

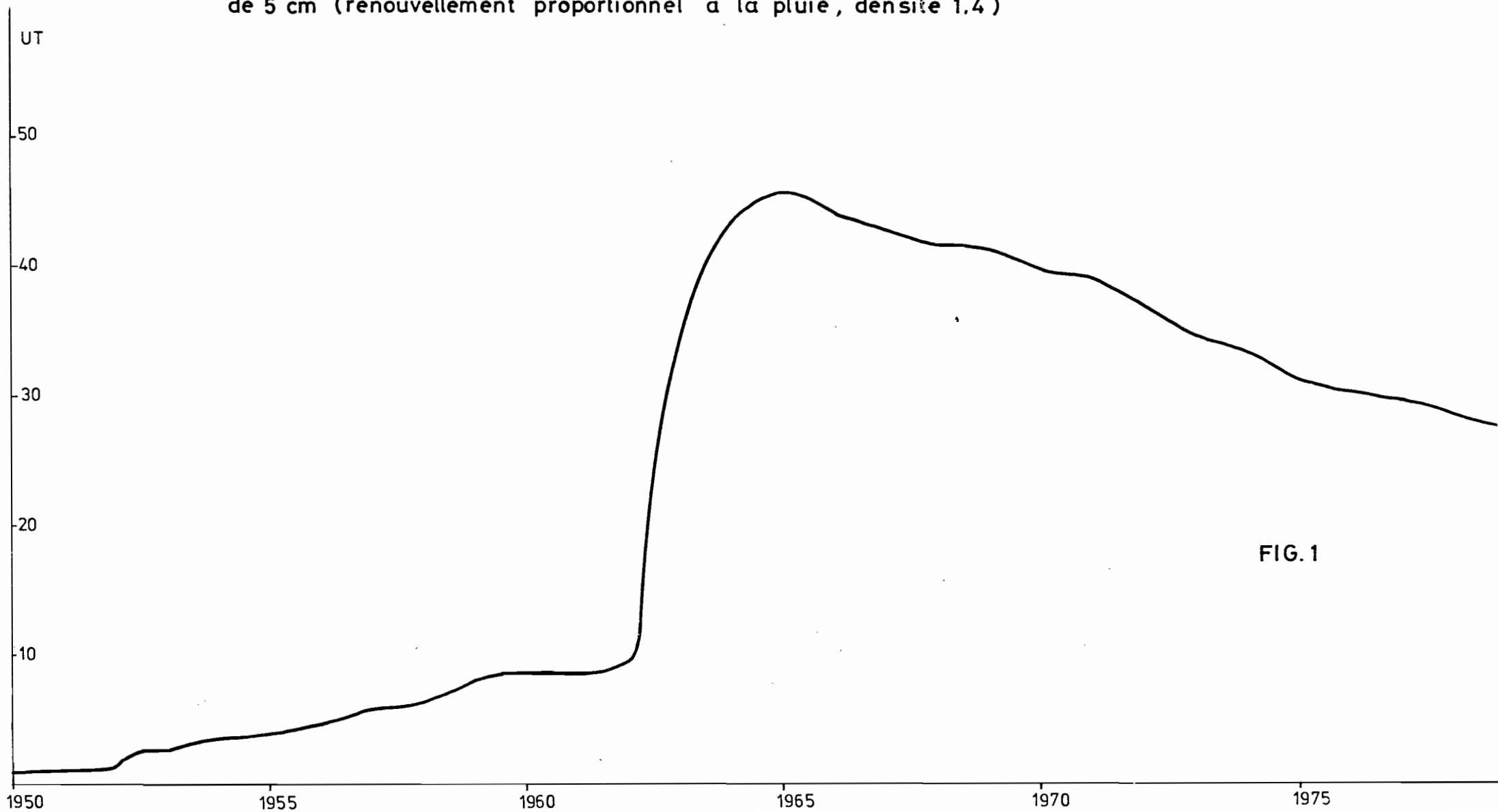


FIG. 1

Pour un renouvellement complet de l'eau de constitution de la masse de gypse, il est également possible d'estimer la teneur finale en fonction du taux de renouvellement, soit :

$$\theta = \frac{\theta_p \cdot r}{5} \left(1 - 0,95^{\frac{100}{r}} \right)$$

On a présenté sur la figure 2 la variation de cette teneur finale dans le cas d'une teneur moyenne de 15 UT dans les précipitations, soit la valeur estimée valable avant les essais nucléaires. On retrouve bien une valeur de 1,5 UT pour un taux de renouvellement de 0,5 %.

Le taux de renouvellement s'exprime, en fait en fonction de 4 facteurs, dont l'un est lié au climat, c'est la pluviométrie annuelle, ou plutôt une fonction de celle-ci, les autres étant caractéristiques de l'accumulation, c'est-à-dire : épaisseur, densité et teneur en gypse. Encore considère-t-on ici la solubilité comme une constante.

On aura donc :

$$r \% = \frac{P_{mm} \cdot 2 \text{ g/l} \cdot 100}{e_{cm} \cdot 10^4 \cdot d \cdot 10^3 \cdot G \%} = \frac{P_{mm}}{e \cdot d \cdot G} \cdot 2 \cdot 10^{-5}$$

Pour une teneur en gypse de 90 %, courante dans les croûtes et encroûtements de surface, le taux de renouvellement pourra varier de $3,18 \cdot 10^{-5}$ pour un encroûtement de 5 cm d'épaisseur et de densité 1,4, à $3,71 \cdot 10^{-6}$ pour un encroûtement plus friable de 50 cm et de densité 1,2.

Compte tenu de ces taux de renouvellement, on peut calculer l'évolution théorique de la teneur en tritium d'une accumulation de surface dans les deux cas. On peut voir que la valeur calculée pour 1980, va de 4 à 27 UT. Elle est bien caractéristique des encroûtements de surface étudiés, comme on le verra plus loin.

Variation de la teneur en tritium de l'eau de constitution
en fonction du taux de renouvellement (r%)

(P=150 mm , Q_P= 15 UT)

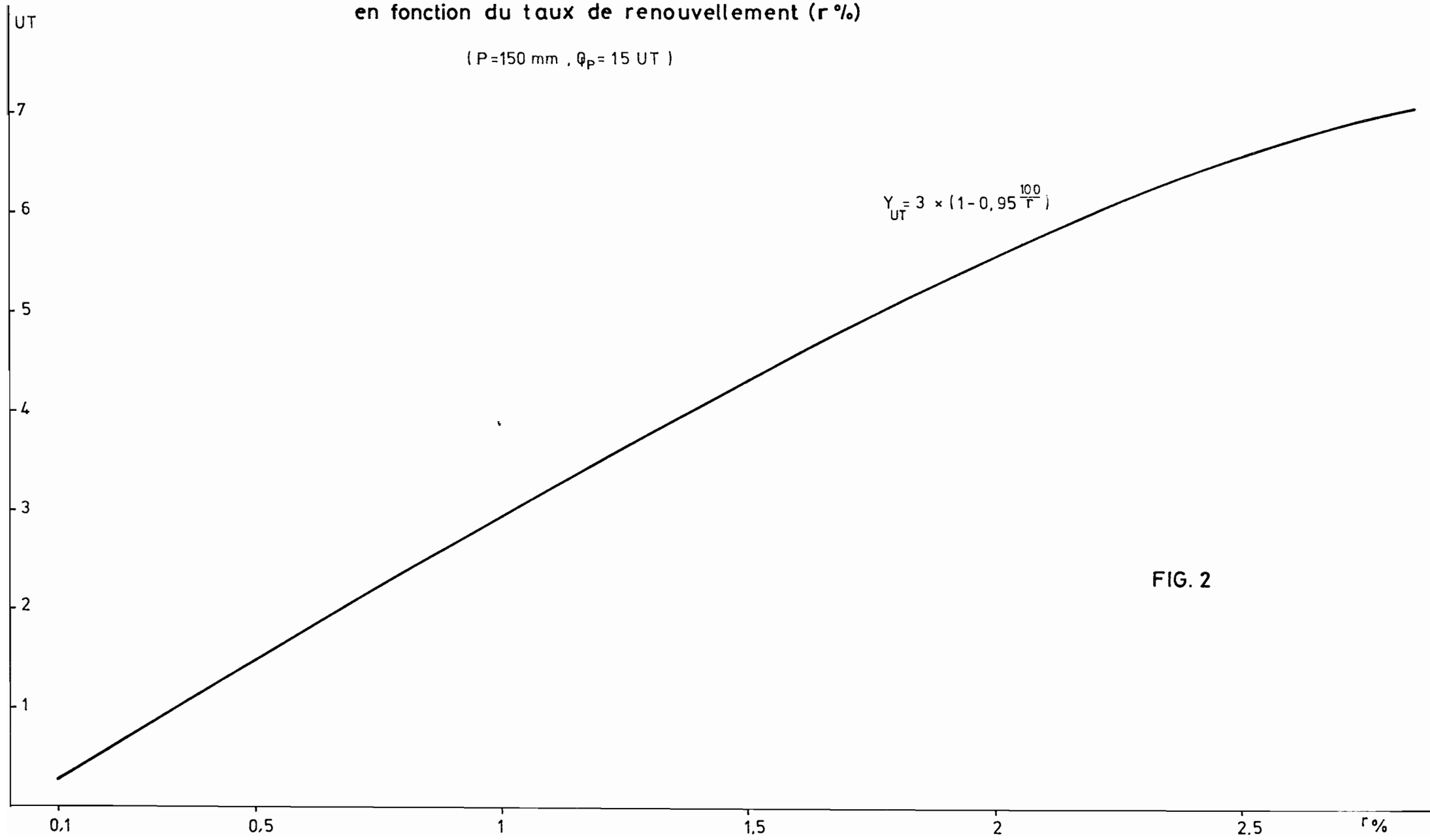


FIG. 2

2°) 2ème cas : formation d'un encroûtement de nappe

Considérons maintenant que la pluie de chaque année solubilise du gypse à raison de 2 g/l, en traversant les terrains gypseux, et va le déposer, par l'intermédiaire d'une nappe phréatique, pour former un encroûtement ou une croûte dans la zone de battement de cette nappe. Nous savons qu'une partie très importante de la pluie est rapidement réévaporée, mais nous supposons que la partie qui s'infiltré, même superficiellement, et est susceptible de dissoudre du gypse, est proportionnelle à la pluie annuelle.

Dans un premier temps, négligeons la partie formée avant 1953, dont on a vu que la teneur moyenne en tritium serait voisine de 1 UT seulement. L'accumulation étant proportionnelle à la quantité de précipitations, serait, déposée sur 1 m², égale à

$$\frac{P_{\text{mm}} \times 2}{1,4 \times 10^4} = 1,4285 \cdot 10^{-4} \times P_{\text{mm}}$$

Prenons donc simplement la pluie annuelle, que nous multiplierons par la teneur moyenne en UT de l'année, obtenue par extrapolation des données de Thonon et d'ailleurs (A.I.E.A. 1969). Nous ferons la sommation de ces produits, en les affectant chaque fois du coefficient de décroissance radio-active, à la puissance de l'année, soit pour une accumulation débutant en 1953, la teneur en UT en

1980 sera :

$$\sum_1^{27} \frac{P_{\text{mm}} \times N \text{ UT} \times 0,95^n}{\sum P_{\text{mm}}} \quad \begin{array}{l} N : \text{ teneur en UT de l'année } n \\ n : \text{ nombre d'années comptées de } \\ \text{1980 vers 1953} \end{array}$$

soit 170 UT environ, dont on peut voir l'évolution théorique sur la figure 3.

Évolution théorique de la teneur en tritium moyenne de l'eau de constitution d'un encroûtement gypseux de nappe (début de formation en 1953)

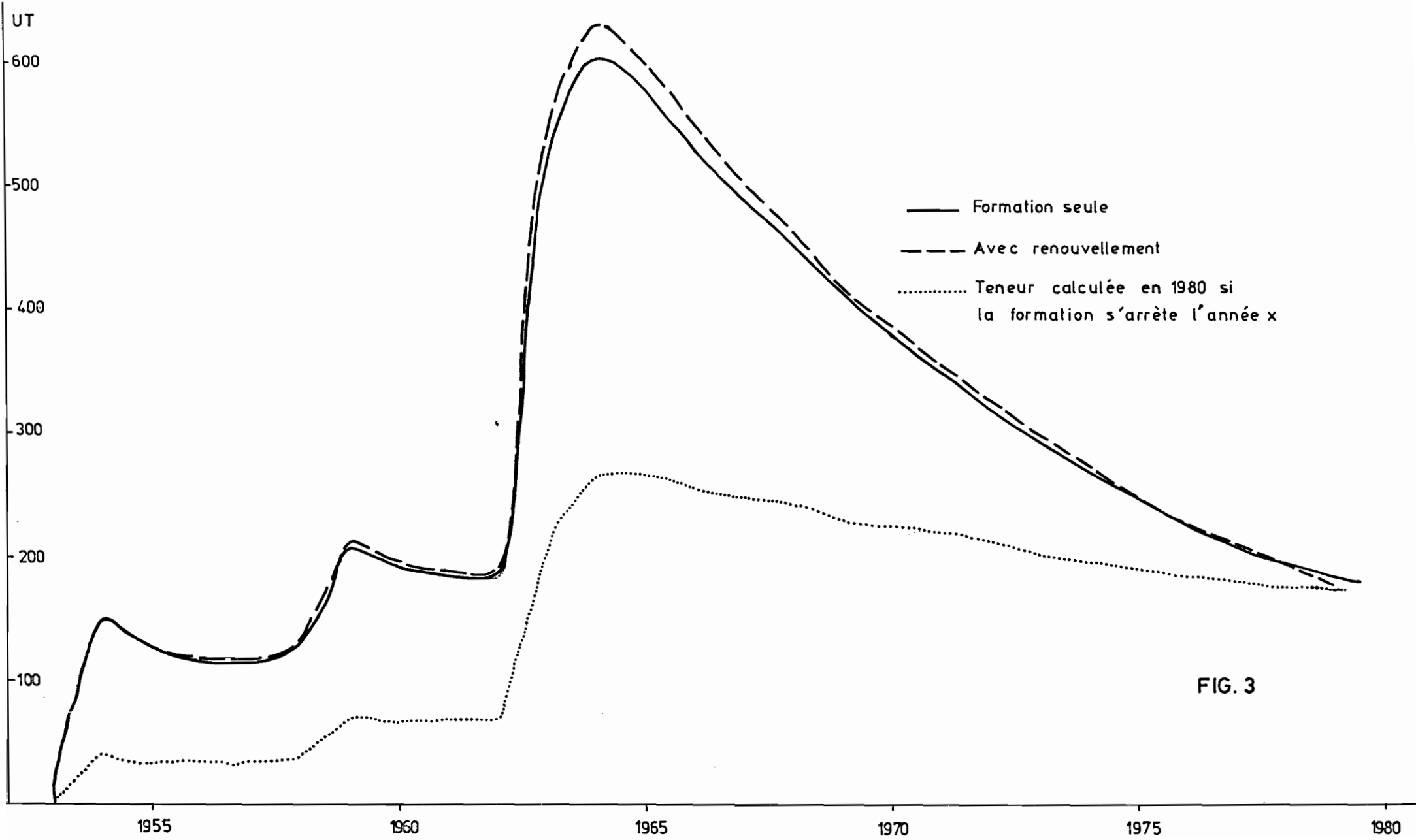


FIG. 3

Inversément, en s'appuyant sur les mêmes hypothèses, il est possible de calculer la valeur théorique de la teneur en ^3H d'un échantillon dont la formation a débuté à une date quelconque (voir figure 4). On remarquera qu'à une même valeur de la teneur en tritium d'un échantillon en 1980, pourront parfois correspondre deux "dates" très différentes pour le début du phénomène.

Il est par contre intéressant de remarquer que même si l'on fait remonter le début d'un encroûtement à 1830, il contiendrait encore théoriquement 4^e UT en 1980.

Notons que de 1980 à 1830, où les totaux pluviométriques sont non ou malconnus et les teneurs en tritium très largement estimées, on a pris 150 mm et 15 UT, la fonction prenant la forme d'une branche d'hyperbole d'équation :

$$Y_{\text{UT}} = 375 \frac{2,311 - 0,95^X}{56,23 + X} \quad X : \text{nombre d'années de formation}$$

3^e) Synthèse

En réalité il est plus probable que les deux mécanismes que nous venons d'envisager ne soient pas toujours séparés, mais qu'ils puissent agir de concert, en particulier dans les encroûtements dont la formation serait actuelle. On conçoit également qu'ils puissent être successifs pour une même accumulation. De la façon dont ces deux mécanismes se succèdent ou se joignent, de la durée de leurs phases respectives, dépendront les teneurs que l'on pourra observer dans les échantillons naturels.

On a porté sur la figure 3, à côté de la courbe représentant l'évolution théorique de la teneur en tritium d'un encroûtement en formation continue, proportionnelle à la pluie, de 1953 à 1980, une autre courbe indiquant les valeurs calculées pour 1980, lorsque l'arrêt de la formation alors éventuellement remplacé par un simple renouvellement, survient à une date quelconque entre 1980 et 1953. On remarquera que si la croissance continue sur la période doit conduire un échantillon à une teneur de 180 UT environ, cette teneur actuelle peut en réalité être nettement plus élevée si le phénomène de formation s'est arrêté avant 1980.

Un arrêt en 1964-65, par exemple, conservera une teneur d'environ 265 UT, soit près de 50 % en plus.

En résumé, les mécanismes de modifications de la teneur en tritium d'une accumulation gypseuse peuvent être schématisés comme suit :

1er cas : soit une accumulation formée en une année avec une teneur θ_0 suivi d'une décroissance liée à la baisse de radioactivité

$$\theta_n = \theta_0 \cdot e^{-0,0565 t} \quad t : \text{nombre d'années entre } 0 \text{ et } n$$

où

$$\theta_n = 0,95 \cdot \theta_{n-1}$$

2ème cas : l'ensemble formé en une ou plusieurs années subit ensuite un simple remplacement proportionnel à la pluviométrie

$$\theta_n = \theta_{n-1} \cdot 0,95 \cdot (1 - r) + r \cdot \theta_{Pn}$$

θ_{Pn} : teneur en tritium de la pluie de l'année n

Si r et θ_{Pn} sont constants, on a $\theta_{n+1} = a\theta_n + b$

3ème cas : formation progressive avec apport annuel proportionnel à la pluviométrie (sans remplacement)

$$\theta_n = \frac{(\theta_{n-1} \cdot 0,95 \cdot \sum_1^{n-1} P_i + \theta_{Pn} \cdot P_n)}{\sum_1^n P_i}$$

ce qui, si l'on connaît le nombre d'années de formation, s'écrit :

$$\theta_n = \frac{\sum_1^n \theta_{Pi} \cdot P_i \cdot 0,95^i}{\sum_1^n P_i}$$

Teneur théorique en tritium d'une croûte en voie de formation

en fonction de la date de début (Le calcul emploie $P=150$ mm et $Q=15$ UT de 1830 à 1952

P mesuré et Q estimé de 1953 à 1979)

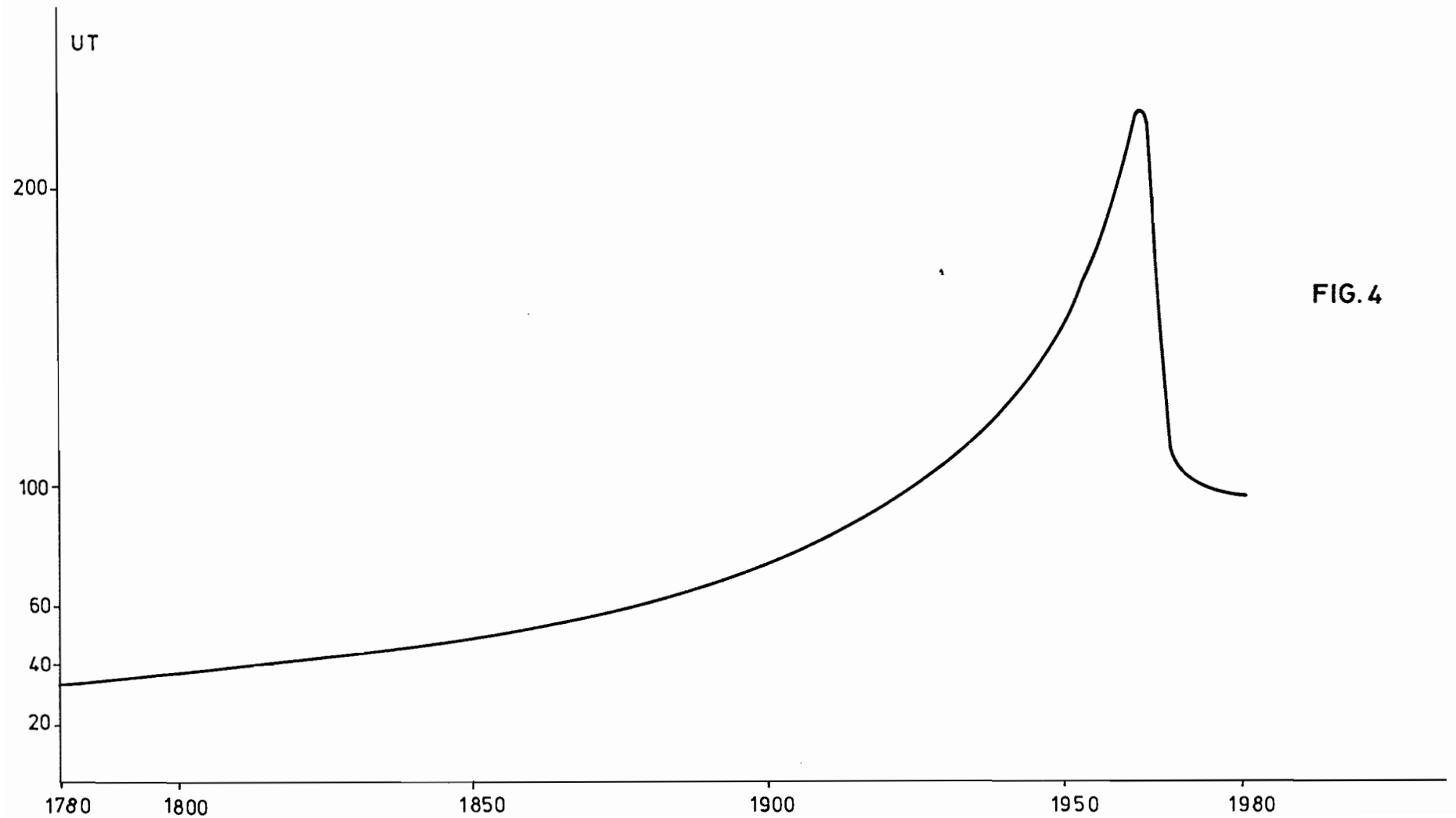


FIG. 4

4ème cas : la formation progressive proportionnelle à la pluviométrie s'accompagne d'un remplacement lui aussi proportionnel

$$\theta_n = \frac{(\theta_{n-1} \cdot 0,95 \cdot (1-r) + r \cdot \theta_{Pn}) \sum_1^{n-1} P_i + P_n \cdot \theta_{Pn}}{\sum_1^n P_i}$$

On considère que dans ce cas le renouvellement se fait en premier. En fait il semble que la formation elle-même agisse dans des ordres de grandeur beaucoup plus considérables que le simple remplacement. On peut s'en rendre compte sur la figure 3 avec renouvellement, le maximum de 1964 est très légèrement supérieur (628 au lieu de 603) et la valeur finale à peu près identique (183 au lieu de 186).

Pour la période antérieure à 1953, où nous prendrons arbitrairement un total pluviométrique de 150 mm par an et une teneur en tritium de 15 UT, on calculera la valeur obtenue au bout de temps de formation variés par la formule :

$$\theta_n = \frac{(\theta_{n-1} \cdot 0,9455 + 0,07) (n-1) + 15}{n}$$

dont la limite est 0,14 si n temps vers l'infini (figure 5).

Ceci nous confirme que les croûtes et encroûtements anciens, à dynamique bloquée, doivent avoir des teneurs très faibles.

. C . Résultats obtenus sur les échantillons naturels

On examinera successivement les résultats obtenus sur plusieurs profils de sol, d'abord sur les accumulations de surface, ensuite sur les accumulations de nappe.

1) Accumulations de surface

a) Profil sur argiles à gypse du Weald (Crétacé Inf.)

Dans la roche-mère observée à la base des "falaises" encroûtées de l'Oued Magroum, sur la route Gabès-Kébili, on observe des argiles à petits lits gypseux et des bancs épais de gypse fibreux.

Evolution de la teneur en tritium d'une croûte en voie simultanée de formation et de renouvellement en fonction de la durée de sa formation ($P = 150 \text{ mm}$, $Q = 15 \text{ UT}$)

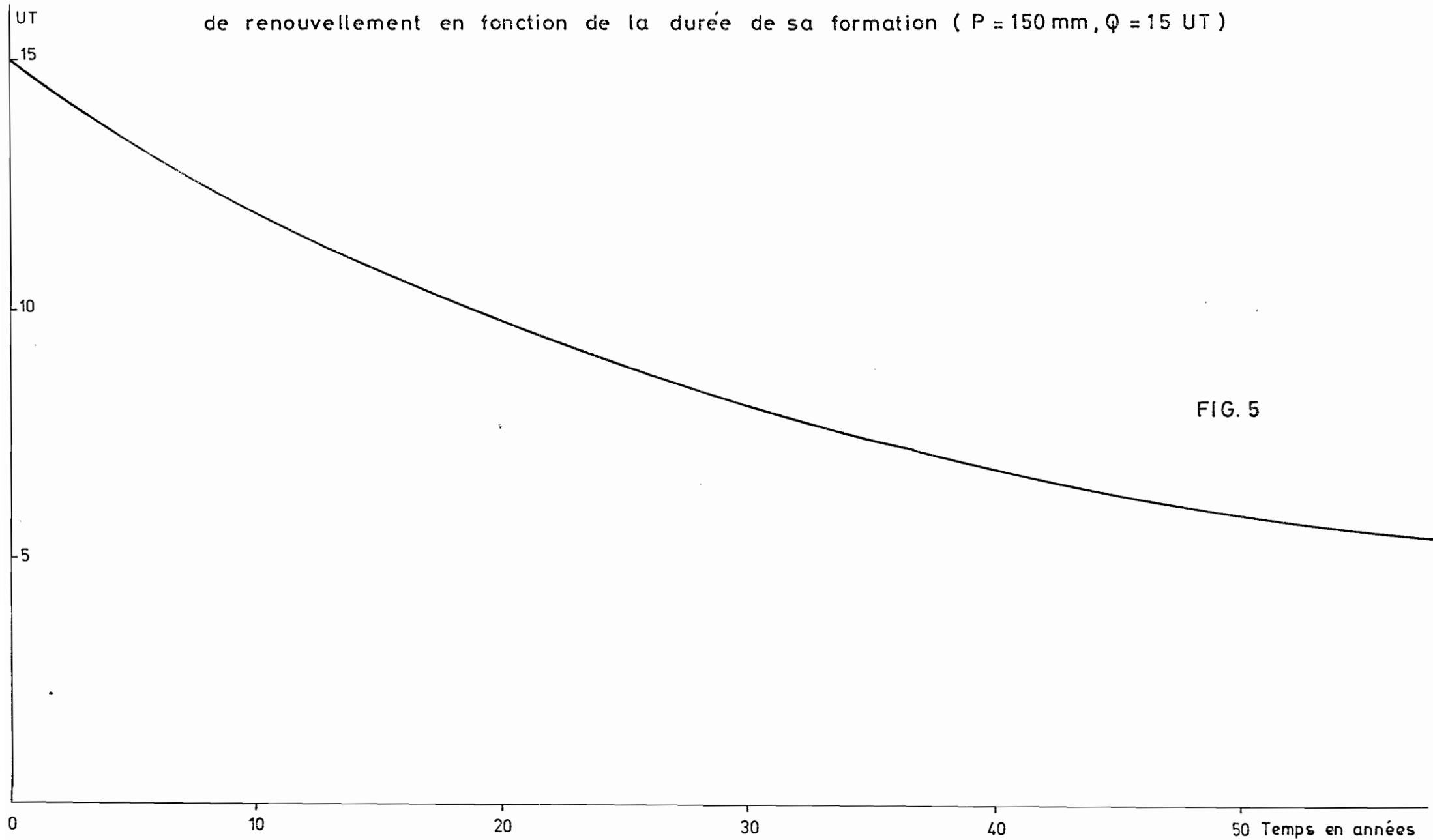


FIG. 5

On a trouvé dans l'argile de 14 à 27 UT, mais moins de 14 UT teneur à préciser après enrichissement) dans le gypse fibreux. L'argile, prélevée sur le front de taille, peut avoir été légèrement contaminée.

Dans l'horizon d'altération, prélevé vers 2 mètres de profondeur on trouve encore 14 à 27, puis 29 ± 10 ou 31 ± 10 dans la zone intermédiaire, 16 ± 8 sous la croûte, et finalement moins de 14 dans la croûte superficielle durcie.

b) Profil sur marnes gypseuses de l'Eocène.

Sur le versant ouest du Djebel Halouga, près de El Hamma, une toposéquence a été étudiée. Un profil représentatif a donné moins de 14 UT pour la croûte gypseuse patinée superficielle, mais 28 ± 8 pour l'encroûtement sous-jacent.

c) Profil sur argiles gypseuses du Mio-Pliocène.

C'est un profil situé près de Méthouia, au nord de Gabès, identique à ceux du Djebel Dissa. On a obtenu là, successivement :

- 29 ± 10 UT dans la partie supérieure de l'encroûtement
- 14 à 27 UT dans la partie moyenne (20-40 cm)
- 69 ± 10 UT à la base.

Dans ce sice POUGET (1968) suggère la formation d'encroûtements de surface à partir d'encroûtements de nappe qui se révélerait donc avoir encore une certaine activité.

d) Profil sur bourrelet éolien gypseux quaternaire.

Le profil sommital d'une toposéquence étudiée a été analysé, ce qui a donné 44 ± 9 UT pour la croûte superficielle, et 37 ± 9 UT, pour le sable éolien gypseux considéré comme roche-mère.

2) Accumulations de nappe.

Profil de sol alluvial gypseux sur encroûtement de nappe.

Ce profil est représentatif de la parcelle du périmètre irrigué d'Aouinet étudiée par ailleurs ; il a donné successivement :

0 - 20 cm	49 ± 10 UT	
20 - 65 cm	39 ± 10 UT	
65 - 90 cm	14 à 27 UT	
90 - 130 cm	14 à 27 UT	
130 à 170 cm	35 ± 10 UT	} encroûtement de nappe
170 à 200 cm	111 ± 10 UT	

. D . Discussion et conclusions.

On remarque un assez bon groupage des valeurs mesurées sur croûtes et encroûtements de surface, soit généralement moins de 14 ou 16 UT (valeurs à préciser) dans la croûte, et autour de 28 à 30 UT dans les encroûtements. Seul celui du bourrelet quaternaire présente une teneur plus élevée, 44 UT, que l'on rapprochera des 49 UT mesurés dans l'horizon superficiel d'Aouinet.

Dans ce dernier profil on remarquera l'indépendance apparente des évolutions du tritium dans la couche superficielle, dans la zone intermédiaire, sans doute peu affectée par la dynamique actuelle, et les horizons profonds, nettement plus riches.

Que peut-on en conclure ? Sous réserve d'études plus approfondies et portant sur des profils plus nombreux, il semble que les accumulations de surface ne subissent actuellement que de faibles retouches de leur teneur en tritium, sans doute causées par un renouvellement de faible taux suite à l'infiltration des eaux de pluies. Par contre, dans les encroûtements de nappe, la dynamique actuelle semble plus active, ce qu'indiqueraient les valeurs plus élevées mesurées.

Pour ce qui est plus précisément des croûtes de surface, on a vu qu'une évolution basée sur un renouvellement d'environ 0,5 % aurait donné environ 28 UT. Ce que nous mesurons montre que ce renouvellement est nettement plus faible. Dans les encroûtements, la même évolution, compte tenu d'une épaisseur 10 fois plus grande aurait dû conduire à une teneur de 4 UT seulement. Nous sommes donc obligés de faire appel à une fraction néoformée. On peut la calculer simplement, en première approximation, en supposant que si le renouvellement seul donne 4 UT, et la formation seule 183 UT, une valeur intermédiaire proviendra d'une combinaison des deux mécanismes.

Si donc un encroûtement présente aujourd'hui par exemple 27 UT,
on aura :

x étant la proportion soumise au seul renouvellement

y étant la proportion soumise à la seule formation

$$x \cdot 4 + y \cdot 183 = (x + y) \cdot 27$$

d'où l'on tire $y = 12,8 \%$, ce qui, obtenu en 27 ans (de 1953 à 1980) représente $0,47 \%$ par an en moyenne, soit encore une progression de $2,5 \text{ mm}$ par an qu'il serait bien difficile de contrôler sur le terrain.

Les dosages dans les encroûtements de nappe ont donné des valeurs entre 111 et 309 UT, donc environ 10 fois supérieures à celles des accumulations de surface. La valeur de 309 UT semble supérieure au maximum théorique calculé, qui serait de 224 UT pour une croûte à partir de 1963.

Dans le cas du profil d'Aouinet, on pourrait proposer l'explication suivante :

- pendant la saison des pluies, l'eau à 100 UT qui tombe sur le profil peut dissoudre une partie du gypse des couches supérieures, mais parvient plus ou moins rapidement à saturation. Une fraction de cette eau peut être retenue dans ces couches, tandis qu'une autre partie s'infiltré sans dissoudre plus de gypse, d'autant plus que la salure diminue en profondeur, et parvient ensuite à la nappe. Compte tenu de l'accumulation de sels dans les couches supérieures au cours de la saison sèche précédente, la solubilité est vraisemblablement plus forte au début et entraîne plus de gypse au début du processus.
- en saison sèche, les flux s'inversent et un processus évaporatoire, confirmé par les mesures tensionométriques, s'installe. L'eau saturée en gypse, qui a pu partiellement s'échanger avec l'eau de constitution de l'encroûtement de nappe, remonte dans le profil, traverse sans y abandonner de dépôt les couches intermédiaires, puis dépose du gypse de néoformation dans les couches supérieures par suite de l'évaporation. La salure augmentant progressivement au cours de la saison, il est également possible que les quantités de gypse qui se déposent vers la surface soient d'autant plus importantes que l'on s'en rapproche.

Enfin, pour ce qui est de l'encroûtement lui-même, il est probable qu'une alimentation latérale par la nappe soit la cause d'accumulations successives qui maintiendraient la teneur en UT à des valeurs plus élevées que vers la surface.

On peut donc penser que croûte et encroûtement de surface subissent tout au plus un renouvellement lent de leur eau de constitution, ce qui implique dissolution et reprécipitation de très faible ampleur, même dans les encroûtements où l'on a cependant des preuves d'une circulation hydrique (0,5 % en moyenne). Dans les croûtes, plus dures et patinées, les mises en solution sont encore plus faibles (< 0,2 %) : on est donc en droit de considérer que ces accumulations de surface n'évoluent pratiquement plus.

On doit cependant noter que l'échantillon analysé ne sera que rarement représentatif de la totalité de l'accumulation et peut avoir été prélevé dans une partie plus riche, formée lors d'une période à forte teneur en tritium de l'atmosphère. Il est d'autre part possible et même probable que l'histoire des accumulations gypseuses de surface ou de nappe n'est pas aussi régulière qu'il a été suggéré ci-dessus, en particulier que les épisodes de formation ou d'échange ne soient pas exactement calqués sur les variations pluviométriques.

Il faut par ailleurs garder à l'esprit que ces estimations sont assez grossières, et nécessiteraient d'être confirmées. Elles appuient néanmoins suffisamment l'hypothèse selon laquelle les accumulations gypseuses de surface ont une dynamique très ralentie, alors que les accumulations de nappe, dont il convient d'apprécier l'importance lors de la mise en valeur, connaissent une dynamique nettement plus active. De nouvelles expériences in situ sont en cours pour le vérifier.

B I B L I O G R A P H I E

- . BLAVOUX B. - 1978 - Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Thèse d'Etat Univ. Paris VI -
- . FERSI M. ZANTE P. - 1979 - Etude d'une toposéquence type du sud tunisien E.S. 159, DRES-ORSTOM Tunis -
- . FONTES J.C. - 1976 - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles. Thèse d'Etat Univ. Paris VI -
- . OLIVE Ph. - 1970 - Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium Thèse d'Etat Paris -
- . POUGET M. - 1968 - Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien. Cah. ORSTOM, série Pédol. vol. VI, N° 3-4, pp 309-366 -
- . SOFER Z. - 1978 - Isotopic composition of hydration water in gypsum. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol 42 pp 1141-1149 -
- . VIEILLEFON J. - 1976 - Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie E.S. 98, DRES-ORSTOM Tunis -
- . VIEILLEFON J. - 1977 - Recherches sur l'analyse granulométrique des sols gypseux. E.S. 137, DRES-ORSTOM Tunis -
- . VIEILLEFON J. - 1978 - Etude de l'application des phénomènes de déshydratation et de réhydratation du sulfate de calcium à l'estimation des teneurs en eau et en gypse des sols gypseux. E.S. 146, DRES-ORSTOM Tunis -
- . VIEILLEFON J. - 1979 - Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. Cah. ORSTOM sér. Pédol. vol. XVII, N° 3 - pp 195-223 -

-o-o-o-o-o-o-o-