

Le titre natronique,

(Première note.)

par J. DELECOURT.

Cette première note a pour but de justifier l'utilité de deux critères nouveaux : le titre natronique et le titre agressif. Leur emploi facilitera l'étude de la composition chimique des eaux tant souterraines que de surface.

I. — LA DURETÉ FRANÇAISE ET LES MILLIVALENCES.

Un degré de dureté français correspond à 10 mgr. de carbonate de calcium dissous à l'état de bicarbonate par litre d'eau, soit à 10/50 millivalences Ca CO^3 .

Nous pouvons, par conséquent, écrire :

Un degré hydrotimétrique = 10/50 millivalences ou

Une millivalence = 5° hydrotimétriques français.

Nous pouvons donc passer de la notation en millivalences à l'estimation en degrés hydrotimétriques français calculés en multipliant les millivalences par cinq.

Réciproquement, nous passons des degrés calculés aux millivalences en multipliant les degrés par deux dixièmes.

Nous avons déjà eu recours à cet artifice ⁽¹⁾ pour démontrer :

1° Que la dureté totale calculée vaut cinq fois la somme des millivalences calcium et magnésium (C, p. 655);

2° Que le titre alcalimétrique en degrés égaux aux degrés hydrotimétriques vaut cinq fois les millivalences CO^3 . On a donc :

$$\text{Th} = 5 (m \text{ Ca} + m \text{ Mg}).$$

$$\text{Ta} = 5 m \text{ CO}^3.$$

Dans ce qui va suivre, nous parlerons uniquement de duretés et de titres calculés correspondant à 10 mgr. de Ca CO^3 par degré hydrotimétrique ⁽²⁾.

II. — EAUX NATRONIQUES ET EAUX ANATRONIQUES.

Considérons une eau caractérisée par ses millivalences acides : $m \text{ CO}^3$, $m \text{ SO}^4$, $m \text{ Cl}$, ainsi que par les millivalences basiques : $m \text{ Ca}$, $m \text{ Mg}$, $m \text{ Na}$ et $m \text{ K}$.

Si la somme des millivalences sodium et potassium est supérieure à $m \text{ Cl}$, nous pouvons en conclure que l'eau contient des cations alcalins combinés à d'autres anions que le chlore des chlorures. Il est donc normal que nous trouvions dans le résidu sec de cette eau des carbonates et des sulfates alcalins. *Nous dirons par définition que cette eau est natronique.*

Si, au contraire, les millivalences chlore l'emportent sur la somme $m \text{ Na} + m \text{ K}$, nous devons bien admettre que des anions Cl sont associés à des cations Ca ou Mg . Dans ce cas l'eau examinée *s'écarte* des eaux natroniques. Nous dirons pour cette raison qu'elle est anatronique ou plus simplement *anatronique*.

(1) J. DELECOURT, Les eaux artésiennes salines du Bassin de Paris, de la Basse et de la Moyenne Belgique (*Bull. Soc. belge Géol., Paléont. et Hydrol.* : A) 1^{re} note, t. XLVI, 1936, pp. 229-259; B) 2^e note, t. XLVII, 1938, pp. 501-526; C) 3^e note, t. XLVIII, 1939, pp. 649-685; D) 4^e note, t. XLIX, 1940, pp. 256-288).

(2) Les liqueurs de savon utilisées en hydrotimétrie sont souvent étalonnées soit au moyen d'une solution titrée de chlorure de calcium, soit au moyen d'une solution titrée de chlorure de baryum cristallisé.

Avec la première, un degré hydrotimétrique représente 10,237 milligrammes de CaCO^3 , tandis qu'avec la seconde, il correspond à 10,246 milligrammes de CaCO^3 par litre d'eau.

Les titres mesurés au savon sont donc un peu plus faibles que les titres calculés, mais la différence n'atteint pas 2,5 %. On rend les titres mesurés et calculés complètement comparables en multipliant les titres au savon par 1,024 ou par 41/40.

Une eau natronique est donc caractérisée par une valeur positive de $(m \text{ Na} + m \text{ K} - m \text{ Cl})$ alors qu'une eau est anatronique quand cette même valeur est négative.

III. — INDICE NATRONIQUE ET TITRE NATRONIQUE.

Posons

$$I = m \text{ Na} + m \text{ K} - m \text{ Cl}$$

et appelons *indice natronique* la valeur de I ainsi définie.

Si I est positif les eaux sont natroniques.

Si I est négatif les eaux sont anatroniques.

L'indice natronique est évalué en millivalences.

Pour définir le *titre natronique* T_n , nous écrivons

$$T_n = 5 I \text{ ou } T_n = 5 (m \text{ Na} + m \text{ K} - m \text{ Cl}).$$

De la sorte le titre natronique sera comparable à la dureté totale calculée et au titre alcalimétrique et nous caractériserons déjà assez convenablement une eau par les expressions

$$Th = 5 (m \text{ Ca} + m \text{ Mg}).$$

$$Ta = 5 m \text{ CO}^3.$$

$$Tn = 5 (m \text{ Na} + m \text{ K} - m \text{ Cl}).$$

Le titre natronique, tout comme l'indice natronique, peut être positif, négatif ou nul.

Si T_n est positif l'eau est natronique.

Si T_n est négatif l'eau est anatronique.

Si T_n est nul, nous dirons que l'eau est captée sur une *limite natronique*.

IV. — LE CYCLE DES EAUX ARTÉSIENNES DE LA BASSE ET DE LA MOYENNE BELGIQUE.

On se rappellera que les eaux artésiennes subissent de profondes modifications dans leur composition chimique au fur et à mesure qu'elles cheminent dans le sens du courant ⁽¹⁾.

En Basse et en Moyenne Belgique, les eaux artésiennes dérivent généralement d'eaux dures phréatiques. Les courants artésiens comprennent alors trois zones principales caractérisées par des eaux dont les duretés totales calculées sont supérieures ou inférieures à six degrés français. La première zone est celle des eaux dures ($Th > 6^\circ$), la seconde, celle de salure ou des eaux douces sodiques ($Th < 6^\circ$). Enfin, la troisième est la zone de sursalure

($Th > 6^\circ$). Elles sont facilement séparables par des isogrades de six degrés de dureté totale calculée, appelée la première *limite de salure*, la seconde *limite de sursalure*.

Les eaux douces sodiques de la zone de salure ont une dureté totale inférieure à 6° et sont toujours natroniques, puisque la presque totalité des millivalences SO^4 et CO^3 est attribuable aux millivalences Na et K.

Il n'en est pas de même des eaux dures et des eaux sursalées qui peuvent être natroniques ou anatroniques.

Nous avons, en effet, déjà décomposé la zone des eaux dures en *zone des eaux dures proprement dites* et en *zone des échanges de bases*. Ces échanges de bases deviennent manifestes dès que les analyses démontrent la présence de bicarbonates et de sulfates alcalins dans l'eau.

Autrement dit, *les eaux dures proprement dites sont anatroniques alors que les eaux d'échange de bases sont natroniques*.

Dès lors ces deux dernières zones sont en contact par une limite natronique caractérisée par $Th > 6^\circ$ et $Tn = 0$.

Cette limite natronique sera appelée *limite d'alcalinité*, parce que si les eaux dures proprement dites sont pratiquement neutres et possèdent un pH voisin de 7, les eaux d'échange de bases contiennent au contraire des sels de bases fortes et d'acides faibles facilement hydrolisables qui leur communiquent une *réaction alcaline* traduite par un pH généralement voisin de 8.

L'ancienne zone de sursalure doit aussi être dédoublée. En effet, près de la limite de sursalure, les eaux sursalées possèdent encore un titre natronique positif souvent même très élevé.

Par contre, les eaux connées, d'origine océanique, ont, comme les eaux océaniques contemporaines, un titre natronique élevé mais négatif.

Il en est fréquemment de même pour les eaux vétériques de bassins clos.

L'ancienne zone de sursalure comprend donc, en partant de la limite de sursalure :

1° *Une zone des eaux sursalées natroniques.*

2° *Une zone des eaux sursalées anatroniques ou des chlorures.*

Les eaux de la zone des chlorures sont généralement caractérisées par l'importance relativement réduite des sulfates et surtout des carbonates par rapport aux chlorures. Il en résulte des titres alcalimétriques faibles qui tendent d'ailleurs vers zéro pour les eaux les plus sursalées connues (D, p. 281, analyses 78, 100, 101 et 102).

Les deux zones sursalées : natronique et anatronique, seront logiquement séparées par une nouvelle limite natronique que nous appellerons *limite de carbonatation*, puisque les eaux de la zone des chlorures sont pratiquement dépourvues de carbonates.

Dès lors les eaux *artésiennes* de même origine que celles de la Basse et de la Moyenne Belgique *examinées au cours du travail déjà plusieurs fois cité* traversent pendant leur trajet souterrain les zones et les limites indiquées au tableau ci-dessous.

ZONE DES EAUX DURES	Th>6°	Tn<0	} Première aire anatronique.
Limite d'alcalinité	Th>6°	Tn=0	
ZONE DES ÉCHANGES DE BASES	Th>6°	Tn>0	} Aire natronique.
Limite de salure	Th=6°	Tn>0	
ZONE DE SALURE OU DES EAUX DOUCES SODI- QUES	Th<6°	Tn>0	
Limite de sursalure.	Th=6°	Tn>0	
ZONE DES EAUX SURSALÉES NATRONIQUES . .	Th>6°	Tn>0	} Seconde aire anatronique.
Limite de carbonatation	Th>6°	Tn=0	
ZONE DES CHLORURES OU DES EAUX SURSA- LÉES ANATRONIQUES	Th>6°	Tn<0	

Dans certains cas particuliers, nous devons, dans nos analyses en millivalences, faire intervenir des éléments généralement accessoires pour mieux définir : dureté totale et titre natronique. Ces éléments sont NO³, Br, I, Bo, Ba, Sr, Li, Fe, Mn, etc. Nous n'en avons pas tenu compte pour simplifier notre exposé. Par des applications numériques, nous verrons dans d'autres travaux comment tous ces ions entrent dans les calculs.

V. — LES EAUX ACIDES.

Les eaux examinées jusqu'à présent dérivent d'eaux dures phréatiques. En régions de roches siliceuses ou silicatées, sédimentaires ou cristallines, on rencontre des eaux très douces phréatiques ou artésiennes à résidu sec extrêmement faible (A, p. 239).

Elles n'ont pas encore trouvé dans le sous-sol les éléments calcareux ou dolomitiques nécessaires à la neutralisation des acides carboniques, météorique et biologique, qu'elles contiennent encore, de ce fait, partiellement à l'état libre. Elles sont

donc *acides*, alors que les eaux dures sont pratiquement *neutres* et que les eaux douces sodiques ou sursalées natroniques sont *alcalines*.

L'acidité peut aussi provenir de l'acide sulfurique formé par l'oxydation des sulfures métalliques et notamment de la pyrite de fer.

Ne nous préoccupons pas pour l'instant des acides libres, carbonique, sulfurique ou chlorhydrique, d'origine volcanique ou postéruptive et supposons, pour simplifier l'exposé, que nous ayons affaire à une eau ne contenant d'autre acide libre que celui fourni par les acides carboniques, météorique et biologique.

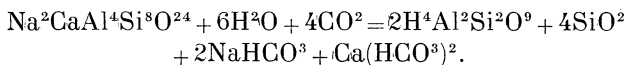
Si nous faisons analyser cette eau avec grande précision, nous faisons une constatation qui nous surprend profondément : son titre natronique est presque toujours positif. *Les eaux acides sont donc généralement natroniques.*

VI. — L'ALTÉRATION DES SILICATES.

A l'examen notre surprise s'atténue. Nous pouvons, en effet, supposer *qu'en l'absence de calcaire et de dolomie libre dans les fissures des roches silicatées, l'eau chargée d'acide carbonique ne peut emprunter de matières minérales solubles à ces roches insolubles qu'en les décomposant.*

Dès 1839, Aleandre Brongniart établissait que le kaolin pouvait provenir de la décomposition de feldspaths (3). Ebelmen montrait en 1845 que semblable altération caractérisait d'autres silicates (4).

Pour fixer les idées, traduisons à notre façon l'altération d'un feldspath sodicocalcique par des eaux chargées de CO² et écrivons



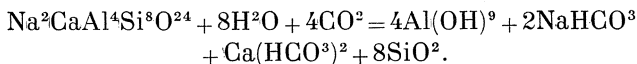
L'action de l'eau chargée d'acide carbonique aboutirait donc à la formation bien connue de kaolin, mais l'eau entraînerait en dissolution de la silice, du bicarbonate de sodium et du bicarbonate de calcium.

(3) BRONGNIART et MALAGUTI, Mémoire sur la nature, le gisement, l'origine et l'emploi des kaolins (*Archives du Museum*, 1839-1841).

(4) EBELMEN, Recherches sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates (*Annales des Mines*, 4^e série, 1845 et suiv.).

C'est le bicarbonate de sodium qui donnerait à l'eau son titre natronique positif.

Sous d'autres climats, la réaction amènerait la latéritisation traduite par



Dans ce cas, l'eau acidulée produit pour la même quantité de CO^2 deux fois plus de silice. Le rapport pondéral entre le bicarbonate de calcium et le bicarbonate de sodium reste le même que pour la kaolinisation. La dureté natronique est également positive. Les eaux infiltrées sont encore natroniques.

Ce qu'il convient de retenir de ce court exposé est que les eaux chargées d'acide carbonique semblent, en l'absence de calcaire et de dolomie libres, décomposer les silicates et y trouver des cations Ca, Mg, Ba, Na, K, Li, Mn, Fe, etc. Elles libèrent aussi de la silice que l'on retrouve d'ailleurs lors des analyses en quantité relativement importante. *Les eaux acides dérivées de roches silicatées seraient donc siliceuses et natroniques en général.*

De l'examen de très nombreuses eaux acides siliceuses, je crois pouvoir conclure que les silicates les plus altérés contiennent encore pour la plupart assez de cations alcalins pour fournir les bicarbonates alcalins communiquant à l'eau un titre natronique positif.

VII. — SILICATES DÉCOMPOSABLES ET ZÉOLITES.

Les silicates attaqués par les eaux chargées d'acide carbonique peuvent être appelés, au point de vue hydrologique, des *silicates décomposables*. Il est nécessaire qu'ils soient altérés et en quelque sorte *décomposés* par les eaux acides pour leur fournir les éléments électro-positifs que l'on y rencontre et en ordre principal le sodium et le calcium. *Les eaux acides dérivant du lavage de roches silicatées ne doivent donc pas nécessairement leur titre natronique positif à des échanges de bases.*

Nous pouvons par conséquent, au point de vue hydrologique, distinguer au moins deux espèces de silicates.

La première comprendra les *silicates décomposables* qui ne peuvent fournir de calcium et de sodium aux eaux infiltrées qu'en se décomposant en plusieurs corps de composition chimique différente.

Les seconds sont les *zéolites*, insolubles dans l'eau, mais qui peuvent *échanger* les mêmes bases sans se désagréger.

Quand une eau natronique est dérivée d'une eau calcaire dure proprement dite, l'origine des bicarbonates alcalins qu'elle contient est imputable à des échanges de bases avec des zéolites ou *des corps à fonctions zéolitiques* ⁽⁵⁾. Au contraire, les bicarbonates alcalins d'une eau acide siliceuse proviennent directement de l'altération de silicates décomposables.

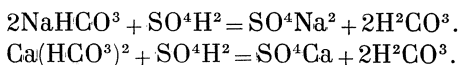
VIII. — LES EAUX ACIDES SULFATÉES.

D'après ce que nous avons déjà vu, les eaux siliceuses acides contiennent ou peuvent contenir les bicarbonates de tous les éléments électro-positifs combinés aux silicates décomposables. Ces éléments sont Ca, Mg, Na, K, Li, Fe et Mn, pour ne citer que les plus importants. Ces eaux sont également fort siliceuses, c'est-à-dire que la silice représente une partie importante du résidu sec. Elles ne peuvent, en massifs dessalés, contenir que le chlore apporté par les chlorures météoriques, si elles ne sont pas contaminées par des infiltrations d'ordre biologique. Leur teneur en chlore, *en massifs complètement dessalés*, est donc très faible et équivaut à peine à quelques milligrammes par litre ⁽⁶⁾. On y trouve normalement $0,00 < m \text{ Cl} < 0,20$.

Mais ces eaux peuvent contenir des sulfates provenant de l'acide sulfurique dégagé par l'oxydation de sulfures métalliques (D, pp. 265 à 266).

Cet acide sulfurique réagit sur les bicarbonates et libère de l'acide carbonique qui attaque de nouveaux silicates décomposables.

On a



Le fer provenant de pyrites attaquées ou de la décomposition de silicates décomposables passe en solution à l'état de bicarbonate ou de sulfate ferreux. *Il se trouve donc combiné et doit figurer parmi les cations.*

En outre, les eaux siliceuses sulfatées acides restent natro-

(5) La glauconie est un corps à fonctions zéolitiques, ou plus exactement le mélange d'un silicate décomposable de fer et de potassium avec des corps à fonction zéolitique. Je reviendrai prochainement sur cette question.

(6) L. GILLET et CH. GUILLEAUME, La teneur en chlore indice de la potabilité des eaux (*Revue univ. des Mines*, 7^e sér., t. XX, n^o 6, 1928, pp. 3-5).

riques puisqu'une partie au moins des millivalences alcalines est balancée par l'acide sulfurique (7).

Qu'elles soient bicarbonatées, sulfatées ou mixtes, les eaux siliceuses acides des massifs dessalés sont donc caractérisées par :

- 1° La présence d'acides libres;
- 2° L'absence presque complète de chlorures;
- 3° Une richesse relativement considérable en silice;
- 4° Un titre natronique positif.

IX. — LE TITRE AGRESSIF.

Comment transcrivons-nous l'analyse d'une eau siliceuse acide?

Nous ne pouvons plus supposer que le total des millivalences acides est égal au total des millivalences basiques, si nous voulons faire figurer les acides en excès. Le pH des eaux acides est d'ailleurs nettement inférieur à 7 et des pH voisins de 4 sont communs.

Pour balancer l'analyse d'une eau acide bicarbonatée, il convient de faire figurer en regard des radicaux CO^3H et CO^3 le cation hydrogène. Pour simplifier et ne pas introduire les radicaux CO^3H monovalent et CO^3 bivalent, nous ne laisserons, comme dans nos autres calculs, subsister que ce dernier.

Nous précisons en donnant un exemple numérique et nous choisirons une eau siliceuse acide très peu minéralisée : celle de Spa-Reine. Nous transcrivons donc l'excellente analyse due à MM. les professeurs Vivario et van Beneden. Les notations sont celles préconisées par le Comité de Standardisation de la Société Internationale d'Hydrologie médicale. Les millivalences y sont notées N/1.000. L'alcalinité au méthyl-orange n'est pas établie. Les millivalences CO^3 combiné sont donc déduites par différence. Voici les transcriptions des résultats qui nous intéressent :

Réaction pH = 5,75.

Température 8,2°.

	Mgr. litre.	N/1.000.
Sodium +	4,75	0,206
Potassium +	0,80	0,020

(7) Les eaux néogènes de Campine sont souvent acides sulfatées.

Magnésium ++	1,10	0,090
Calcium ++	3,80	0,190
Fer ++	0,20	0,007
	<hr/>	<hr/>
Somme des cations.	10,65	0,513
Chlore —	3,00	0,084
SO ⁴ — —	traces	0,000
HCO ³ —	43,00	0,705
	<hr/>	<hr/>
Somme des anions	46,00	0,789
Acide borique H BO ²	traces	
Acide silicique H ² Si O ³	8,82	
Total des éléments dosés.	65,47	
Résidu sec à 180°	30,00	

Cherchons maintenant à *balancer* les résultats et à déterminer les duretés et titres.

Le total des millivalences acides vaut 0,789

Le total des millivalences basiques vaut. 0,513

La différence vaut donc.

 0,276

Cette différence est *l'acidité libre*. Elle est exprimée en millivalences. *Nous appellerons titre agressif le quintuple de l'acidité libre.*

Le titre agressif est donc donné par

$$T_s = 0,276 \times 5 = 1,38 \text{ degrés français,}$$

égaux aux degrés hydrotimétriques, alcalimétriques et natroniques.

Dès lors notre analyse devient

$$m \text{ CO}^3 = 0,705$$

$$m \text{ SO}^4 = 0,000$$

$$m \text{ Cl} = 0,084$$

$$\Sigma a = 0,789$$

$$m \text{ Ca} = 0,190$$

$$m \text{ Mg} = 0,090$$

$$m \text{ Na} = 0,206$$

$$m \text{ K} = 0,020$$

$$m \text{ Fe} = 0,007$$

$$m \text{ H} = 0,276$$

$$\Sigma b = 0,789$$

Le titre agressif $0,276 \times 5$ vaut, par conséquent,

$$T_s = 5 \text{ m H.}$$

Quant au titre alcalimétrique, il est, dans ce cas, donné par

$$Ta = 5 \text{ (m CO}^3 \text{ — m H).}$$

Nous en tirons

$$Th = 1,40^\circ.$$

$$Ta = 2,15^\circ.$$

$$Tn = 0,71^\circ.$$

$$Ts = 1,38^\circ.$$

Le total des matières contenues dans le résidu sec s'exprime par

Cations dosés	10,65
Cl	3,00
CO ³ combiné (0,705 — 0,276) × 30 . .	12,87
Si O ² = 8,82 : 1,3	6,78
	33,30

La silice intervient pondéralement pour 20,5 % du résidu sec. Nous constatons par cette analyse très bien faite que l'eau possède :

- 1° Une dureté calculée totale inférieure à six degrés;
- 2° Un titre natronique positif;
- 3° Un titre alcalimétrique supérieur à la dureté totale, ce qui confirme la présence de carbonates alcalins;
- 4° Un titre agressif positif;
- 5° Une quantité relativement importante de silice dissoute.

L'eau de Spa-Reine est une *eau siliceuse acide*, dont la dureté est inférieure à 6°. Nous l'appellerons pour cette raison une *eau douce acide*.

Le titre agressif doit être déterminé directement à la source, ce qui ne manque pas d'être compliqué. Il est plus simple en général de prendre un échantillon supplémentaire, que l'on additionne sur place, d'un excès de carbonate de calcium chimiquement pur. La différence entre la dureté totale calculée, déterminée après quelques jours pour l'eau additionnée de CO³Ca avec celle de l'eau brute est le titre agressif avec une précision suffisante (8).

Le titre agressif exprime d'ailleurs en degrés hydrotimétriques la quantité supplémentaire de carbonate de calcium qu'une eau acide peut encore faire passer en solution.

(8) On obtient même des chiffres suffisamment approchés en partant des alcalinités au méthyl-orange.

En milligrammes par litre cette quantité vaut dix fois le titre agressif.

Pour l'eau de Spa-Reine, on trouve $10 T_s = 13,8$ mgr. par litre.

X. — LES EAUX AGRESSIVES.

La quantité de matières dissoutes dans l'eau de Spa-Reine est minime. La somme $Th + Ts = 2,78^\circ$ indique qu'au cours d'un parcours souterrain prolongé, à l'abri de l'acide carbonique de recharge, une eau semblable ne peut contenir plus de $10 \times 2,78 = 27,8$ mgr. de carbonate de calcium correspondant au bicarbonate dissous. Mais nous connaissons dans nos régions des eaux infiltrées non soumises à la recharge carbonique (D, pp. 261 à 262) dont le titre alcalimétrique est supérieur à 30° et par conséquent près de quinze fois supérieur au titre alcalimétrique des eaux de Spa-Reine.

Il doit donc exister des eaux acides dont la dureté totale calculée est très supérieure à celle des eaux de Spa-Reine et je le prouverai à l'occasion par des exemples numériques.

Nous appellerons eaux agressives les eaux acides dont la dureté totale calculée est supérieure à 6° . Nous avons déjà défini l'eau de Spa-Reine qui est une eau douce-acide de dureté totale inférieure à 6° français (9).

Dès lors, nous pouvons facilement concevoir que la zone des eaux douces acides est séparée de la zone des eaux agressives par une isograde de 6° hydrotimétriques pour laquelle $Th = 6$, $Tn > 0$ et $Ts > 0$. Cette isograde sera appelée *limite d'agressivité*.

Les eaux cesseront d'être agressives dès que l'acide carbonique sera pratiquement neutralisé. A ce moment, T_s sera très faible, pratiquement nul, mais les eaux seront encore natroniques. *Il sera difficile de les distinguer d'eaux de la zone des échanges de bases dont elles auront toutes les propriétés, tout en ayant une origine complètement différente.*

Si elles rencontrent par la suite au cours de leur trajet souterrain des roches contenant des corps à fonctions zéolitiques à pouvoir permutant positif, elles échangeront leurs cations cal-

(9) Les eaux de Spa-Reine ne contiennent pas d'acide carbonique de recharge, mais d'autres eaux des régions de Spa, Chevron et Grandmenil sont carbogazeuses. La recharge carbonique y est évidente. Ces eaux acidulées sont toutes natroniques; certaines sont douces acides, d'autres sont agressives avec des duretés totales parfois très élevées.

cium et magnésium et donneront naissance à des eaux qui ne différeront pas des douces sodiques.

Au contraire, si elles pénètrent dans des sédiments de zone d'eau dure qui ont perdu le pouvoir permutant positif *mais conservent le pouvoir permutant négatif*, elles échangeront leurs bases sodiques contre du calcium ou du magnésium et pourront devenir anatroniques. Elles ne différeront plus alors des eaux dures proprement dites.

Ces considérations vont nous permettre de déterminer les variations de la composition chimique des eaux au cours de leur cycle souterrain.

XI. — LE CYCLE DE L'EAU SOUTERRAINE.

L'eau météorique, lorsqu'elle touche le sol, est pratiquement caractérisée par $Th=0$, $Tn=0$, $Ts > 0$.

En y pénétrant, elle absorbe d'abord l'acide carbonique résultant d'actions biologiques et par conséquent son titre agressif augmente.

Si les eaux météoriques ainsi infiltrées rencontrent, dès le début de leur cycle, des roches calcaires, dolomitiques ou contenant simplement du carbonate de calcium en quantité suffisante, elles neutralisent rapidement leur agressivité et deviennent des eaux dures bicarbonatées calciques.

En massif dessalé, leur faible teneur en chlorures alcalino-terreux ⁽¹⁰⁾ suffit à leur communiquer un titre natronique faible mais négatif. Ces eaux anatroniques sont de véritables eaux dures et le cycle des eaux souterraines se poursuit, dans ce cas, suivant le processus déjà indiqué au IV.

Mais si les eaux météoriques pénètrent directement dans les sédiments complètement dépourvus de calcaire et de dolomie d'un massif complètement dessalé, les phénomènes se compliquent. Le tableau suivant indique les modifications de la

(10) En dehors des pollutions organiques, l'origine de ces chlorures alcalino-terreux est à rechercher dans le chlorure de sodium météorique, qui passe en solution dans l'eau pluviale. L'eau météorique chlorurée sodique pénétrant dans les sols de végétation échange le sodium de son chlorure contre du calcium ou du magnésium fourni par un complexe humique doué du pouvoir permutant négatif. Parmi les corps à fonctions zéolitiques, nous connaissons donc déjà :

- a) Les zéolites naturels ou de synthèse;
- b) La glauconie et les sables verts;
- c) Les complexes humiques.

composition chimique des eaux depuis l'eau météorique jusqu'à l'aboutissement aux eaux fossiles, vétériques ou connées. Nous avons ainsi :

Eau météorique	Th=0	Tn=0	Ts>0	
I. Zone des eaux douces acides ...	Th>6°	Tn>0	Ts>0	pH<7
a) Limite d'agressivité ou première isograde de six degrés.	Th=6°	Tn>0	Ts>0	pH<7
II. Zone des eaux agressives	Th>6°	Tn>0	Ts>0	pH<7
b) Limite de neutralité ou première limite natronique ...	Th>6°	Tn=0	Ts=0	pH=7 (11)
III. Zone des eaux dures... ..	Th>6°	Tn<0		pH=7 (11)
c) Limite d'alcalinité ou deuxième limite natronique ...	Th>6°	Tn=0		pH=7 (11)
IV. Zone des échanges de bases	Th>6°	Tn>0		pH>7
d) Limite de salure ou deuxième isograde de six degrés.	Th=6°	Tn>0		pH>7
V. Zone de salure ou des eaux douces sodiques	Th<6°	Tn>0		pH>7
e) Limite de sursalure	Th=6°	Tn>0		pH>7
VI. Zone des eaux sursalées natroniques	Th>6°	Tn>0		pH>7
f) Limite de carbonatation ou troisième limite natronique.	Th>6°	Tn=0		pH>7
VII. Zone des chlorures	Th>6°	Tn<0		pH voisin de 7

Les sept zones ainsi délimitées dans ce cas sont séparées par trois isogrades de 6° hydrotimétriques français de dureté totale calculée, pour lesquelles $Th=6^\circ$ et $Tn>0$, et par trois limites natroniques pour lesquelles $Tn=0$ et $Th>6$.

Il existe cette fois deux aires natroniques et deux aires anatroniques suivant le tableau ci-dessous :

Première aire natronique (I + II).

Limite de neutralité.

Première aire anatronique (III).

Limite d'alcalinité.

Seconde aire natronique (IV + V + VI).

Limite de carbonatation.

Seconde aire anatronique VII.

Les massifs dessalés comprennent les eaux des zones I à IV.

La seconde aire natronique est donc à cheval sur la limite de dessalure.

(11) Ou plus exactement voisin de 7.

XII. — LES CYCLES TRONQUÉS.

Les zones II à VII existent dans le terrain houiller du Couchant de Mons. Les eaux agressives les moins dures dont je possède une analyse complète ont une dureté calculée de 7,5 degrés français. Il est néanmoins à peu près certain que des cycles complets existent dans les formations houillères où l'on déterminera prochainement l'existence d'eaux douces acides.

Pour le courant des craies sénoniennes du Bassin de Paris, une seule zone est connue, celle des eaux dures. Il n'y a dans ce cas qu'une zone anatronique et il n'existe pas de zones natroniques connues.

En ce qui concerne les eaux des sables albiens du Bassin de Paris dont je viens de reprendre l'étude au moyen d'analyses plus précises, les eaux dures proprement dites n'existent pas, contrairement à ce que je pensais d'abord. *La zone des eaux agressives et celle des échanges de bases sont en contact.*

Il n'y aurait donc dans ce cas qu'une seule aire natronique comprenant les zones I, II, IV et VI.

Dans certains déserts salés, les eaux pluviales pénètrent directement dans un sous-sol susceptible de leur fournir du chlorure de sodium et du sulfate de chaux par simple dissolution. Ce sous-sol contient des échangeurs de bases à fonction permutante négative et les eaux passent directement aux sur-salées anatroniques.

Si l'existence de cycles complets paraît donc probable, il existe des preuves suffisantes pour établir que beaucoup de cycles ne comprennent qu'une série incomplète de zones. Nous les appellerons des *cycles tronqués*.

CONCLUSION.

Il est impossible de faire figurer ici les données numériques de centaines d'analyses d'eaux dont l'examen m'a conduit aux notions de titre natronique et de titre agressif.

Je me réserve de reprendre ces chiffres pour montrer à quel point les critères nouveaux vont simplifier les recherches lors de l'examen de la composition chimique des eaux : souterraines, superficielles, continentales, océaniques ou de bassin clos.

La notion de titre natronique va nous permettre d'aborder d'une façon beaucoup plus directe la genèse des dépôts salins. Enfin, les notations nouvelles nous seront d'un grand secours pour entamer l'étude systématique des eaux minérales.
