

# Au sujet des contraintes hydriques

E. BELTRAN,

et

R. LEROY,

*Professeur de Technologie  
et Biophysique  
à l'Institut Agricole d'Algérie,*

*Ingénieur  
des Arts et Manufactures,  
chargé de recherches  
au Centre National  
de la Recherche Scientifique.*

Le problème de l'eau, qui commande étroitement toutes les propriétés des solutions, et qui domine par conséquent l'énorme masse de travaux physico-chimiques dont s'accroît tous les ans la littérature, est peut-être celui qui attire le moins de chercheurs alors qu'il demanderait de la part de tous, une offensive générale et coordonnée

F. VLES. Arch. Phy. Biol.

XV - n° 2 - 1938 - p. 31

## INTRODUCTION

Notre étude a pour but d'essayer d'expliquer les comportements des êtres vivants dans les milieux humides. On sait, en effet, l'importance de l'humidité du milieu pour la plupart des phénomènes biologiques. La vie des végétaux en est entièrement tributaire, mais les insectes, les animaux supérieurs, l'homme lui-même sont loin d'échapper à son influence.

Nous avons cherché à dégager quelques idées capables de guider dans la recherche de ces actions, et nous appuyant sur les principes de la thermodynamique, nous avons étudié le paramètre général des équilibres hydriques, c'est-à-dire la variation isotherme de l'énergie libre (1) ; paramètre auquel nous donnons, ici, le nom de contrainte de l'eau parce qu'il mesure la force avec laquelle l'eau est tenue dans la substance.

Lorsque l'on étudie les métabolismes d'un être et de l'atmosphère qui l'enveloppe, on s'aperçoit que les échanges ne sont pas limités aux constituants : oxygène, azote, acide carbonique, mais que la vapeur d'eau joue un rôle très important. Ce rôle, dans certains cas, est même primordial et l'absence d'eau dans l'air ou son excès entraînent une mort rapide. C'est pourquoi, l'étude du paramètre contrainte dans l'air et dans l'être, des rapports des énergies qui fixent l'eau dans l'atmosphère d'une part, dans le milieu biologique de l'autre, nous paraît indispensable.

---

(1) L'étude du potentiel thermodynamique conduit aux mêmes expressions.

## RELATIONS ENERGETIQUES

Considérons un mélange d'air sec et de vapeur. Nous sommes en présence d'un mélange de deux phases gazeuses, définissant un système thermodynamique. Son étude analytique complète peut se réaliser, dans ses développements les plus poussés (2). Nous simplifierons le calcul, pour la commodité de cet exposé.

Soit T la température absolue, déterminée par un thermomètre centigrade, qui, dans le milieu, marque  $t^{\circ}$  C (3). Appelons P la tension de vapeur d'eau saturante à T, c'est-à-dire, la tension de vapeur d'eau en équilibre avec l'eau liquide à cette température (4). Soit, p la tension partielle réelle de la vapeur d'eau, dans le système, à cette même température.

Nous admettrons, en première approximation, que la loi des gaz parfaits, peut s'appliquer à la vapeur d'eau. Dans ce cas, on suit l'équilibre rapporté à la molécule-gramme, donc 18 gr. de vapeur d'eau. Le travail isotherme nécessaire pour amener la molécule gramme de vapeur d'eau de la pression p (partielle-actuelle) à la pression P (équilibre saturant) est alors le travail de compression isotherme, que nous désignons par - c et égal à :

$$- c = \int_p^P p. dv \quad (1)$$

si on désigne par c le travail fourni par ce système.

Avec la relation moléculaire des gaz parfaits :

$$pv = RT \quad (2)$$

nous sommes conduit à l'expression élémentaire et classique.

$$- c = \int_p^P p. dv = RT \int_p^P \frac{dp}{p} = RT (L P - L p)$$

$$c = RT L \frac{P}{p} \quad (3)$$

Pour la molécule gramme de vapeur d'eau nous prendrons  $R = 0,08206$ , et nous passerons les logarithmes népériens d'intégration aux logarithmes décimaux des tables (5).

Nous aurons, numériquement, pour 18 gr. d'eau

$$c = (0,848) (2,30259) T. \log. \frac{P}{p}$$

$$c = 0,19526 T. \log. \frac{P}{p} \times 10^4$$

(2) DUHEM. Traité d'énergétique.

(3)  $T^{\circ}K =$  valeur arrondie  $(273,1 + t)$ .

(4) Valeurs connues et données par les tables.

(5) International Criticals Tables of numerical data National research council. N. Y. 1926. donnent comme valeur usuelle de  $R = 0,08206$  (litre) (atmosphère) (degré)  $-1$  (mol. gr.)  $-1 R$  varie suivant les systèmes d'unité. Avec les pressions en kilogrammes.  $R = 848$  (litre) (kilog m2) (degré)  $-1$  (mol. gr.)  $-1$ .

Dans notre formule il faut rapporter au  $cm^3$  g. d'eau.

Cette formule est dans le système C.G.S. Transformée dans le système pratique, de façon à évaluer c en kilogrammètre, elle devient :

$$(I) \quad c = 0,19482 T. \log. \frac{P}{p}$$

formule dans laquelle c est exprimé en kilogrammètres.

Cette formule fondamentale est obtenue en admettant que la loi des gaz parfaits s'applique. Un calcul, plus exact, exigerait l'introduction de la fugacité (f), selon Lewis et Randall (6). Les calculs aboutissent à considérer la pression actuelle (p) d'un gaz imparfait comme la moyenne géométrique entre sa fugacité et la pression théorique calculée à partir de la loi des gaz (7), mais, aux faibles pressions qui vont intervenir dans notre travail, toujours inférieures à l'atmosphère, il est sensé de confondre (f) avec (p), comme nous le faisons dans notre calcul.

Enfin, il convient de remarquer que l'expression (I) représente la variation d'énergie libre moléculaire entre les deux états (P) et (p).

Nous insisterons sur la généralité, la puissance, la forme mathématique, de notre égalité fondamentale. Elle règne sur les équilibres physiques généralisés. Elle domine l'ensemble de nos modes d'expression analytique, appliqués aux relations fonctionnelles des phénomènes naturels, physiques, voire biologiques. C'est, en tous cas la forme logarithmique généralisée qui, de nos jours, résume toute la physique et la biologie quantifiée (8).

Pour des raisons que nous allons expliciter plus loin, nous substituons à la formule (I) rapportée à la molécule-gramme (18 g. d'eau), la valeur C rapportée à 100 grammes d'eau. Il y a, proportionnalité entre ces grandeurs, ce qui nous permet d'écrire :

$$C = c \frac{100}{18} \quad (5)$$

et

$$C = 0,19526 \frac{(100)}{(18)} T. \log. \frac{P}{p}$$

soit

$$C = (1,0833). T. \log. \frac{P}{p} \quad (II)$$

Cette formule (II) étant calculée sur 100 grammes de vapeur d'eau.

Si l'on considère le mélange air sec-vapeur d'eau rapporté à 1 kg. d'air sec, c'est-à-dire, si l'on définit le mélange en indiquant le nombre de grammes de vapeur d'eau qui sont mélangés avec 1 kg d'air sec, on obtient un mode de calcul sur l'air humide absolument remarquable. C'est le seul moyen possible pour juger et comparer, combiner deux types d'air humide.

(6) Thermodynamics, Mc Graw. Hill. N. V. 1923.

(7) VLES, Cours de Physique Biologique, tome I, p. 93.

(8) La variation de l'énergie libre des mélanges de gaz parfaits a bien cette forme (DUHEM-MATHIEU). Elle est importante parce qu'elle est applicable au mélange solution d'eau et d'un corps soluble (relation de GIBBS-DUHEM). Elle s'applique aux solutions diluées que nous verrons plus loin.

(9) G. et J. A. REBOUL. — Sciences expérimentales et probabilités, Montpellier, 1942.

La encore il s'agit d'un fait d'une généralité considérable. Chaque fois que de l'eau ou de la vapeur d'eau se trouve associée mélangée avec une autre substance, il faut toujours traiter le produit mélange-humide, à l'aide du support sec de l'eau. Dans l'industrie, on rapporte de la sorte, tous les problèmes de teneur en eau libre à la base sèche (résidu sec) du produit. Ce procédé, pour l'air humide, aboutit aux calculs actuellement classiques sur les abaques psychrométriques, les mélanges d'air, la climatisation. En adoptant ce prototype de raisonnement, nous savons que l'état hygrométri-

que de l'air ( $e$ ) est défini par le rapport  $\frac{p}{P}$ . Et, ceci est strictement valable

pour ces conditions (10). Si, on substitue à  $e$ , l'état hygrométrique pour 100 usuel des manuels, soit  $E$ , on aura :

$$E = 100. e = 100 \frac{p}{P}$$

d'où

$$\frac{P}{p} = \frac{100}{E} \quad (III)$$

et enfin, notre formule type appliquée à l'air humide devient au lieu de l'égalité (II),

$$C = 1,0833 T. \log. \frac{100}{E} \quad (IV)$$

Ce résultat montre qu'il est très facile de calculer le travail de compression, variation d'énergie libre du mélange, pour 100 g. de vapeur d'eau. Il suffit, dans l'équation (IV), de mesurer la température  $T$ , et l'état hygrométrique rapporté à 100, de l'air mélange humide, mis en observation.

Le travail  $C$ , dont on vient de donner l'expression analytique, amène, par définition, le mélange air-vapeur d'eau à son « point de rosée ». Si, ce travail est faible, la vapeur d'eau n'emploie pas beaucoup d'énergie pour arriver au point de rosée du mélange, et s'y déposer sous forme « liquide ». On dira que l'extraction de l'eau du mélange d'air est commode, ou encore que l'air humide cédera facilement de l'eau. Si, au contraire, ce travail ( $C$ ) est très élevé, la vapeur d'eau du mélange s'échappera plus difficilement sous forme d'eau. Somme toute, cette grandeur représente un travail destiné à vaincre un état de vapeur d'eau plus ou moins contrainte dans le système. Nous proposons d'appeler et nous désignerons par le mot « contrainte » cette variation d'énergie libre nécessaire à rejoindre le point de rosée du mélange. Un air humide à faible contrainte cédera facilement son eau. Un air humide à forte contrainte ne le cède que plus difficilement.

Cette notion de contrainte énergétique de l'eau dans un mélange d'air et de vapeur devient applicable à tous les systèmes qui contiennent de l'eau sous une quelconque de ses formes à la condition de prendre pour valeur de  $p$  la pression partielle de vapeur d'eau du système considéré.

Ces généralités présentées, nous pouvons examiner de plus près les expressions analytiques qui nous ont permis de définir la contrainte rapportée à 100 gr. d'eau dans un mélange homogène gazeux d'air sec-vapeur d'eau.

La formule (IV) permet, nous l'avons déjà indiqué, le calcul numérique d'une contrainte. Ainsi soit de l'air à 20° C et avec un état hygrométrique

(10) Ce qui n'est pas vrai si on raisonne sur 1m3 d'air humide .

de 60 p. 100, nous aurons, comme contrainte, toujours rapportée à 100 gr. d'eau :

$$C/B = (1,0833) (313,1) \log. \frac{100}{60} = 70,53$$

Nous pouvons aussi comparer deux airs humides. Par exemple, considérons un air (A) défini par sa température 20° C, et 60 p. 100 d'état hygrométrique. Il a une contrainte calculée C/A = 70,53. Soit un air humide (B) dont la température sera 40° et l'état hygrométrique 80. On aura :

$$C/B = (1,0833) (313,1) \log. \frac{100}{80} = 32,91$$

L'état (B) a une contrainte plus faible que l'état (A), il cèdera de l'eau plus facilement que l'état (A).

Il est aussi possible de rechercher à quelles conditions doit satisfaire un système air-vapeur d'eau, pour représenter une contrainte égale à celle d'un corps donné. Quel air humide à 20° aura la même contrainte que le corps B (C/B = 32,91). Il suffira de résoudre l'expression :

$$32,91 = (1,0833) (293,1) \log. \frac{100}{X}$$

X étant l'état hygrométrique cherché. On trouve X = 77,74.

Nous pouvons aussi, à 20°, chercher l'état hygrométrique qui aurait une contrainte double de celle du corps A (C/A = 70,53). On aura :

$$141,06 = (1,0833) (293,1) \log. \frac{100}{X}$$

On trouve X = 36,01.

Pour permettre l'usage commode et pratique de la formule II, nous avons tracé un abaque. Cela nous est apparu indispensable parce que, très souvent, les déterminations météorologiques fournissent l'état hygrométrique (E), et la pression partielle (p) de la vapeur d'eau. Il faut alors, pour appliquer la formule (II), passer de (p) à (T), ce qui nécessite l'emploi des abaques psychrométriques.

Ces remarques nous ont conduits à établir un diagramme polyvalent, donnant la valeur de C et utilisant soit T et E, soit E et p. En outre, ce graphique condense un des aspects des diagrammes psychrométriques, et permet un usage assez complet pour les études des airs humides.

Les lignes tracées sont toutes des droites. La série des droites (E) qui représentent l'état hygrométrique p. 100 du mélange sont des parallèles. Il en est de même pour les droites, représentant (t) et (p). Les droites des contraintes (C) sont des Thalès. La contrainte se détermine dans le plan cartésien au point d'intersection de (t) et (E) ou encore à celui de (p) et (E). (Fig. 1).

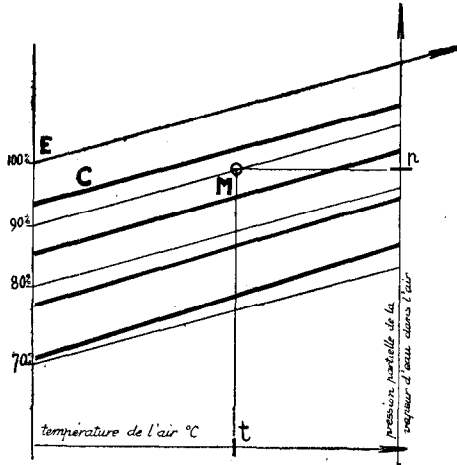


Fig. 1. — Diagramme psychrométrique.

Imaginons une solution aqueuse renfermant une molécule-gramme d'un corps dissous, par litre. A une température centigrade de  $0^{\circ}$ , il faut, pour équilibrer la pression osmotique de cette solution une pression de 22,26 atmosphère kg/cm<sup>2</sup>, soit 22,99 kg/cm<sup>2</sup>. Plaçons cette solution dans un tube de 1 cm<sup>2</sup> de section (Fig. 2) contenant une membrane semi-perméable (M) qui

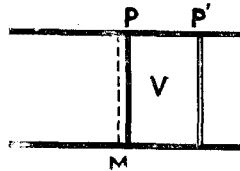


Figure 2

ne laisse passer que l'eau pure, et non le solide dissous. La membrane peut être considérée comme un piston P infiniment mobile. On le maintient avec une pression de 22,99 kg. Si P vient en P', il aura permis la sortie de V grammes d'eau, V volume compris entre P et P'. Donc si nous voulons recueillir 100 gr. d'eau, il faudra faire à P un déplacement de 100 cm., soit 1 mètre. Dans ces conditions le travail mécanique qui apparaît est de 22,99 kilogrammètres.

Ce raisonnement suppose que la pression osmotique après le déplacement du piston est encore la même qu'à l'origine, ce qui est vrai puisque nous nous plaçons dans les conditions théoriques où le volume V est une fraction infiniment petite du volume total de la solution.

Ceci nous montre que le travail nécessité par la sortie de 100 gr. d'eau liquide, dans un système eau-corps dissous est représenté par le même chiffre numérique que la pression osmotique de la solution, calculé en Kg/cm<sup>2</sup>, si l'on néglige la contraction du volume de l'eau au cours de la dissolution.

Il sera aisé de calculer la contrainte d'une solution diluée, en appliquant la loi de VANT'HOFF. Si on appelle  $c$  la concentration du corps dissous

(g par cm<sup>3</sup> de solution), M masse moléculaire du corps dissous, i coefficient de dissociation ionique du corps dissous (1 pour les non électrolytes), on aura, en appliquant ce qui précède la contrainte C en kilogrammètre, à toute température, par l'égalité

$$C = i RT \frac{c}{M} \quad 1,033$$

Par exemple, prenons une solution de glucose diluée, renfermant 72 gr. pour 1.000 cm<sup>3</sup> de glucose. A 15° on parlera d'une contrainte de l'eau solvant dans le milieu de :

$$C = I (82) (288) \frac{72}{(1000) (180)} = 1,033 = 9,7 \text{ kilogrammètres}$$

M = 180, masse moléculaire du glucose.

Il est possible de combiner l'équation cryoscopique des milieux dilués  $\Delta = i. B n$  dans laquelle i est le coefficient ionique de dissociation, n molécules grammes présentés par litre, B constante caractéristique du solvant eau et du corps dissous (par exemple 1,870 pour le saccharose en g/1000 cm<sup>3</sup>) avec la loi de VANT'HOFF, transformée en contrainte :  $C = i. n. R. T.$  1,033 Kgm. on obtient alors :

$$C = 1,033 RT \frac{\Delta}{B} \text{ kilogrammètre}$$

expression dans laquelle n'apparaissent plus les grandeurs i. et n.

Ainsi, pour une solution normale de saccharose, B = 1,87 g/litre et n = 1, i = 1, on trouve :

$$(6) \quad C = \frac{1,03 (0,082)}{1,87} T. \Delta \text{ kilogrammètre}$$

à 0° centigrades, nous aurons :

$$(V) \quad C = \frac{(1,03) (0,082)}{1,87} (273) \Delta = (1,03) (11,9) \Delta \text{ kilogrammètres}$$

$$C = 12,257. \Delta \text{ kilogrammètre.}$$

Cette valeur calculée C est celle qui correspond à la température de congélation. En considérant cette valeur comme celle de la contrainte à 0°, on ne commet qu'une erreur négligeable (11).

Nous voyons qu'il est possible d'évaluer, avec assez de précision, par la formule approchée (V), la valeur de la contrainte C d'une solution à 0° centigrades, si on détermine avec quelques soins la valeur de l'abaissement cryoscopique  $\Delta$ . Cette valeur, après nous avoir permis de calculer C à 0°, nous donne encore la valeur de C pour une température quelconque, (relation (6)). Nous pouvons, en désignant par C/o la contrainte à 0° centigrades et C/t la contrainte à t° R, écrire (12) :

$$C/t = C/o \frac{(273 + t)}{273}$$

(11) En réalité on ne devrait pas prendre la température de congélation du solvant (273) mais bien celle de la solution (273 -  $\Delta$ ). De même nous admettons implicitement que i reste constant, que n est le même ce qui n'est pas tout à fait exact à 273 et à (273 -  $\Delta$ ) degré absolu de la température du mélange. Les corrections sont données par Armenius, Stenius (2).

— Stenius — « Der Osmotische Druck im Meerwasser — Finska Vetenska Societatens Forhandlingar », 1903-1904-XLVI-6.

(12) Cette relation n'est pas rigoureuse puisqu'elle néglige la modification de l'activité ionique avec la température, ce qui n'est pas toujours admissible.

Nous pouvons, à titre d'exemples, calculer les contraintes de liquides dilués connus. Ainsi les mesures cryoscopiques faites sur l'eau de la mer, donnent, pour l'eau de l'océan Atlantique  $\Delta = 2,075$  (VLES 1921, ROSCOFF), et pour l'eau de la Méditerranée  $\Delta = 2,29$  (BOTTAZI) (13).

L'application de la formule (V) donne alors :

C (eau de l'océan) = (1,033) (11,9) (2,075) = 25,51 kgm.

C (eau de la Méditerranée) = (1,033) (11,19) 2,29) = 28,15 kilogrammètres.

D'autres auteurs ont donné pour le sérum de l'homme  $\Delta = 0,562$  (GRAM 1923) ; le sérum du lapin  $\Delta = 0,592$  (HAMBURGER) ; le sérum du cheval  $\Delta = 0,585$  (HAMBURGER) ; le lait de vache  $\Delta = 0,514$  (HAMBURGER).

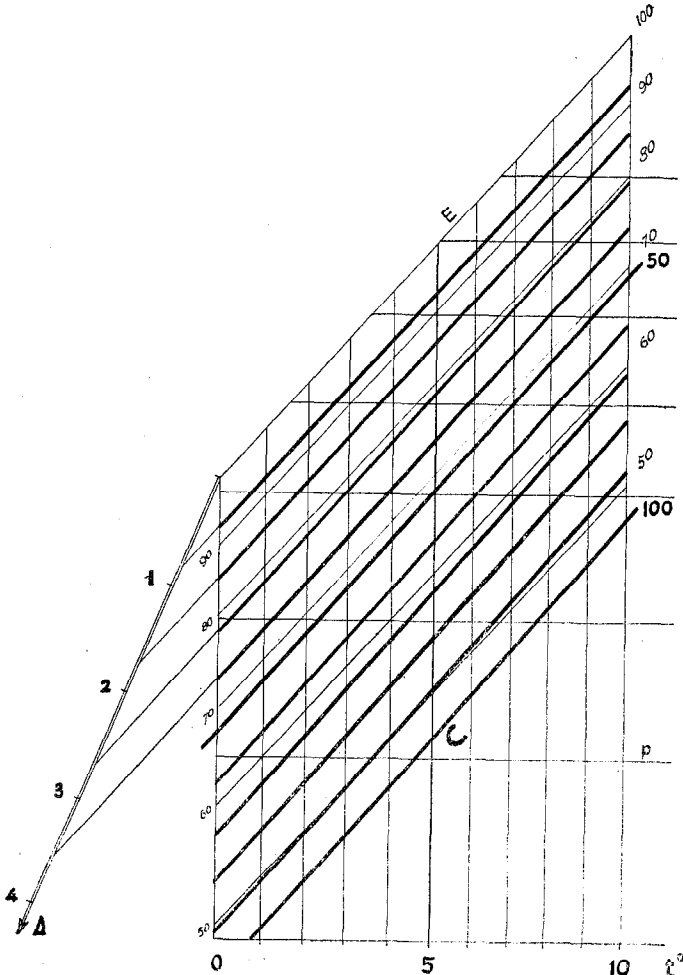


Fig. 3. — Contraintes  $C$  en fonction de l'abaissement cryoscopique  $\Delta$ . En prolongeant les lignes isothermes en trait fort jusqu'au point d'intersection avec l'axe  $\Delta$  on obtient la valeur approchée de l'abaissement cryoscopique du corps considéré.

(13) BOTTAZI : Osmotische Druck und elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeiten der einelligen organismen. Ergebnisse der Physiol. 1908.

— La pression osmotique des animaux marins. Arch. Ital. Biol. 1897.



Ces valeurs expérimentales, donnent pour ces différents liquides :

C (sérum homme) = 6,907 kilogrammètres.

C (sérum du lapin) = 7,277 kilogrammètres.

C (sérum du cheval) = 7,191 kilogrammètres.

C (lait de vache) = 6,318 kilogrammètres.

Valeurs des contraintes en kilogrammètres à 0° centigrades. La *figure 3* donne immédiatement la solution graphique de ces problèmes.

Nous avons étudié l'équilibre de deux masses gazeuses humides, à l'aide de la connaissance de leurs contraintes respectives, de même nous pouvons, maintenant, étudier ce qui se passe si on met en présence un mélange air-sec-vapeur d'eau (phase gazeuse), avec une solution diluée (phase liquide). Nous caractérisons la contrainte hydrique de l'air humide par C (G) et la contrainte hydrique de la solution par C (S). Ici, il existe un film interfacial de passage du gaz à la solution. Dans ce film, des phénomènes particuliers s'établissent. Mais, dans l'ensemble, si le gaz (G) et le solide (S) restent au contact un temps suffisant, des échanges auront lieu qui auront pour but d'équilibrer les contraintes hydriques ; de l'eau quittera le milieu de plus faible contrainte pour passer dans le milieu de contrainte supérieure. Cette question sera reprise un peu plus loin et appliquée à certaines applications industrielles. Pourtant, pour illustrer déjà cette conception, nous traiterons quelques exemples. Nous venons de voir que l'eau de la mer Méditerranée a une contrainte calculée, d'après les mesures cryoscopiques C (S) : 28,15 kilogrammètres. Quel serait le climat de l'air humide en équilibre avec cette solution. C'est un mélange d'air-sec et de vapeur d'eau qui, à 0°, doit avoir une contrainte C (G) = 28,15. Ce qui nous donne :

$$28,15 = (1,084) (273) \log. \frac{100}{E}$$

La solution de l'expression est  $E = 80,33$ . Par suite, l'air humide qui à 0° fait équilibre à la contrainte de l'eau de la mer Méditerranée, et dans lequel il n'y a plus évaporation de l'eau de mer aurait un état hygrométrique de 80,33 p. 100. De même, également à 0°, l'air qui sera en équilibre avec le sérum humain, c'est-à-dire qui ne permet ni son évaporation, ni sa dilution, s'obtient en résolvant l'expression :

$$6,907 = (1,084) (273) \log. \frac{100}{E}$$

ce qui impose pour E une valeur de 94,77 p. 100. Pour le lait on aurait :

$$6,318 = (1,084) (273) \log. \frac{100}{E}$$

soit pour l'air humide en équilibre, un état hygrométrique de 95,20 pour 100.

Le cas des solutions concentrées ou des solutions colloïdales est beaucoup plus compliqué. Il est concevable que, même dans ce cas, l'abaissement cryoscopique, soit en relation avec la variation d'énergie libre du système. Cependant, certaines restrictions dans l'assimilation avec les solutions diluées, s'imposent. Le comportement ionique des solutions concentrées d'une part, les équilibres colloïdaux de l'autre, sur lesquels il est bien délicat d'interpoler, exigent pour chaque cas des mesures directes expérimentales de la variation d'énergie libre.

Nous n'avons pas tenu compte dans cet exposé sommaire de l'activité ionique de la solution. Dans certains cas, cette activité constitue un phénomène dominant qui ne permet pas l'application des expressions précédentes, même à titre d'ordre de grandeur.

Prenons par une solution 0,2 N (1,17 gr. par litre) de Na Cl, son abaissement cryoscopique est :

$$\Delta = 0^{\circ}85$$

d'où une contrainte à 0° (formule V) :

$$C/o = 10,4 \text{ et à } 25^{\circ} C/25 = 11,35$$

La mesure directe en partant de la pression de vapeur à 25° donne :

$$C25 = 8,53$$

L'erreur, en adoptant la vapeur cryoscopique de la contrainte atteint 25 %.

Dans les pages semi-théoriques qui précèdent, nous avons montré la possibilité de comparer deux ou plusieurs états de contrainte hydrique des milieux, renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau. Nous nous permettons ainsi d'ajouter une notion nouvelle, après tant d'autres. Si nous le faisons volontiers, c'est comme nous allons le montrer dans les chapitres qui suivent, qu'il s'agit d'un procédé commode et chiffré capable d'aider à résoudre un grand nombre de problèmes d'ordre essentiellement pratique.

Au point de vue des termes employés, nous nous servirons du mot grec « anankos » qui signifie « Contrainte ». Deux milieux d'égale contrainte hydrique seront iso-anankes. Egalement, un milieu de contrainte supérieure à une contrainte de référence sera hyper-ananke. Si la contrainte est plus faible, nous dirons que le milieu est hypo-ananke.

Dans ces premières pages, nous avons montré la possibilité de comparer les états de l'eau dans des milieux différents. Pour obtenir ce résultat il nous a été nécessaire d'introduire un paramètre nouveau et une forme nouvelle d'expression. En réalité, nous passons ainsi de la notion vague d'humidité plus ou moins grande et de liaison plus ou moins forte de l'eau à une représentation mathématique des phénomènes. Nous allons, dans les chapitres suivants, appliquer ces modes de calcul à l'étude de quelques phénomènes présentant un intérêt agricole pratique. Nous verrons que par ce moyen il est possible d'explicitier un certain nombre de notions restées assez vagues et de préciser avec exactitude, des grandeurs dont on n'avait jusqu'ici idée que par suite de l'expérience pratique.

## CLIMAT GEOGRAPHIQUE

La première application qui vienne à l'esprit est naturellement l'étude de l'atmosphère en différents lieux, à différentes époques, à différentes heures. Le travail est aisé. Il suffit d'appliquer la formule fondamentale en y introduisant les données météorologiques. Les chiffres relevés sont, en général, la température et l'état hygrométrique pris au même instant. La contrainte s'en déduit immédiatement. Cependant les données météorologiques sont fournies sous une autre forme par les centres météorologiques. Les états hygrométriques journaliers sont indiqués à 7 h., 13 h., 18 h. tandis que sont fournis les maxima, les minima et les moyennes de températures diurnes et nocturnes. Ainsi les températures ne

sont pas celles qui correspondent à l'instant où l'état hygrométrique a été mesuré. Il est facile de lever cette difficulté en se servant de la tension à vapeur. Le diagramme joint à ce travail permet, connaissant état hygrométrique et tension de vapeur, d'en déduire la contrainte immédiatement (voir page 82).

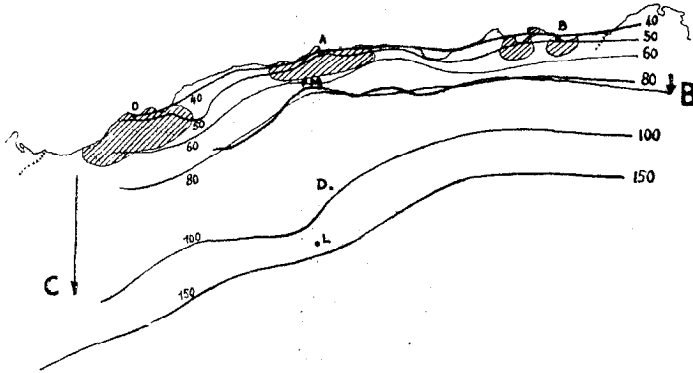


Fig. 4. — Climat d'été de l'Algérie.

Sur l'axe front de mer O, A, B représentent respectivement Oran, Alger, Bône. Dans la direction nord-sud, vers l'intérieur des terres A, M, D, L représentent Alger, Médéa, Djelfa, Laghouat. La contrainte C croît régulièrement de 40 à 150 vers l'intérieur. La ligne (B) limite expérimentale de culture du blé coïncide sensiblement avec l'isotherme 80. D'autre part, les zones littorales hachurées représentent les aires de culture du vignoble.

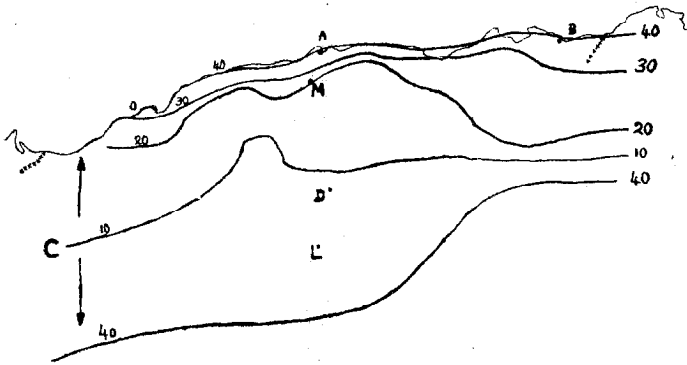


Fig. 5. — Climat d'hiver de l'Algérie.

En hiver la zone de contrainte minimum se trouve à l'intérieur des terres, sur les Hauts-Plateaux, marquant l'influence des eaux contraintes de la Méditerranée. On remarque, sur les figures 4 et 5, la constance annuelle de la contrainte sur le littoral et voisine de 40.

Il est intéressant de rechercher, d'abord la valeur de la contrainte dans certains cas types.

Considérons d'abord une masse atmosphérique constamment en équilibre (température et pression de vapeur), avec une masse d'eau :

1° *L'eau est de l'eau libre pure*, par exemple eaux pluviales, eaux de ruissellement. L'état hygrométrique est 100 %, la pression de vapeur est celle de l'eau à la température considérée, la contrainte est nulle.

2° *L'eau est incluse dans un système hypoaérique*. — Il s'agit de la mer (eaux salines), de massifs forestiers... Dans ce cas la contrainte de l'eau atmosphérique est égale à la contrainte de l'eau dans le système hypoaérique en équilibre. Il suffit de se reporter au diagramme pour voir que dans les atmosphères en équilibre avec les eaux océaniques (point de congélation voisin de 2°), la contrainte de l'eau est de 25,5 ; au bord de la Méditerranée (point de congélation 2°5) la contrainte est un peu plus élevée 28.15. Ceci caractérise les climats très maritimes.

Considérons maintenant l'atmosphère à une température différente de l'eau ou du système contenant de l'eau.

Deux cas sont à considérer :

1° La température du système aquifère est fixe, il s'agit d'eaux de sources importantes, de massifs glaciers...

En ce cas l'eau impose à l'air sa tension de vapeur qui est fixe.

Dans une région comme celle de Saint-Moritz, en Suisse, où les vents dominants passent sur des massifs glaciaires, la pression de vapeur sera en été, constamment celle de l'eau de fusion des glaces, soit 6 à 7 mb. d'où une contrainte si la température est de l'ordre 10 à 15° comprise entre 80 et 150. On voit que dans l'air des montagnes, pendant l'été, existe une contrainte particulièrement élevée. Pendant l'hiver, au contraire, la température descend à 0° et la contrainte tend vers zéro.

Ceci caractérise un climat de montagne, et en général, les climats des pays où courent des eaux vives.

2° La température du système aquifère subit une variation diurne.

L'eau impose à l'air une tension de vapeur variable avec sa propre température.

Supposons l'eau libre, et qu'au matin à 7 heures eau et air soient à la même température, 15°. La pression de vapeur est 17 mb. La contrainte 0. Au cours de la journée l'air s'échauffe plus vite que l'eau. A 13 h. la température de l'air est 25, celle de l'eau 18°, la contrainte est 60.

Puis l'air se refroidit, mais l'eau continue à s'échauffer. A 18 heures elle a 20°, l'air a 22°, la contrainte est retombée à 10. Pendant la nuit, l'eau va être plus chaude que l'air d'où non seulement une contrainte nulle, mais des condensations extrêmement importantes. La contrainte diminue brutalement au coucher du soleil.

Ceci caractérise les climats à eaux dormantes, étangs, lagunes, marécages.

Chose curieuse, ce même phénomène caractérise également certains aspects du climat saharien. Le sol du Sahara constitue, en effet, un système enfermant de l'eau à une contrainte donnée soumise aux variations diurnes de température. La pression de vapeur en juin à Tamanrasset est voisine de 5 mb le matin, de 7 le soir, avec des contraintes respectives de 220 à 300 environ. La contrainte tombe très rapidement dès la chute du jour.

Il existe un dernier cas type réalisé dans certaines régions sahariennes où l'air se trouve constamment hors d'état de céder ou d'acquiescer de l'eau. Dans ce cas, nous retrouvons la fixité de tension de vapeur et une contrainte toujours fonction de la seule température.

Nous allons, nous inspirant de ces idées, étudier le climat de l'Algérie. Les remarquables travaux de l'Institut de Physique du Globe d'Algérie, nous en fournissent les éléments (14).

Pour les stations côtières la valeur de la contrainte est remarquablement fixe et voisine de 40. Si nous nous souvenons que l'eau de la Méditerranée a une contrainte de 28,15, on voit qu'il y a un remarquable équilibre en toutes saisons.

Prenons une ligne plus intérieure passant grossièrement à 50 km. de la mer, jalonnée par Mascara, Relizane, Orléansville, Médéa, Tizi-Ouzou, passant au nord de Constantine pour aboutir vers Souk-el-Arba. Là apparaissent un climat d'hiver et un d'été. En hiver la contrainte est plus petite que sur la côte variant entre 12 et 30. Les eaux de ruissellement imposent leur régime, la contrainte de l'eau de mer ne se fait plus sentir. En été, la contrainte est nettement élevée, de l'ordre de 70. Il y a sécheresse l'été, excès d'humidité l'hiver.

L'excès d'humidité d'hiver se prolonge dans le Sahara bien au delà de ce que l'on pourrait penser. La contrainte moyenne d'El-Goléa en janvier est plus petite que celle d'Alger.

Il faut atteindre Reggan pour avoir une contrainte de 90, Tamanrasset pour une contrainte moyenne d'hiver de 150. Par contre, les contraintes d'été prennent des valeurs extraordinairement élevées.

Suivons la ligne sensiblement Nord-Sud : Alger, Médéa, Djelfa, Laghouat El-Goléa, In-Salah, Tamanrasset.

---

(14) P. SELTZER. — Esquisse climatologique de l'Algérie (période 1913-1938).  
— J. DUBIEF et J. LAURIOL. — Moyennes climatologiques du Sahara algérien pour la période 1925-1939.

VALEURS DE LA CONTRAINTE DE L'AIR

MATIN 7 h.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger .....	40	40	40	55	45	40	40	50	40	40	40	40
Djelfa .....	20	20	35	48	60	68	92	95	58	40	25	25
Djelfa .....	10	17	30	50	60	55	100	95	48	35	27	12
Laghouat .....	26	40	48	75	80	100	120	118	70	55	38	28
El-Goléa .....	32	51	75	102	120	150	140	123	115	85	42	35
In-Salah .....	60	61	90	125	140	150	170	165	140	115	65	58
Tamanrasset .....	130	140	160	145	150	190	230	175	174	140	122	120

13 HEURES

Alger .....	60	62	62	80	70	68	70	70	70	70	68	60
Médéa .....	50	60	80	90	120	125	160	165	130	100	68	50
Médéa .....	70	75	105	118	140	150	195	195	132	105	75	65
Laghouat .....	85	110	125	155	158	180	205	210	150	130	107	85
El-Goléa .....	130	150	165	200	210	250	230	210	200	165	140	125
In-Salah .....	140	150	150	195	210	210	290	250	210	185	135	135
Tamanrasset .....	210	180	225	245	210	230	260	230	210	210	195	210

Les chiffres de ce tableau, généralisés à toutes les stations, ont permis d'établir les cartes d'isothermes des climats d'été et d'hiver en Algérie. (Voir fig. 4 et 5).

Les fig. 6 et 7 donnent les climogrammes en contraintes de ces lieux à 7 h. et 13 h.

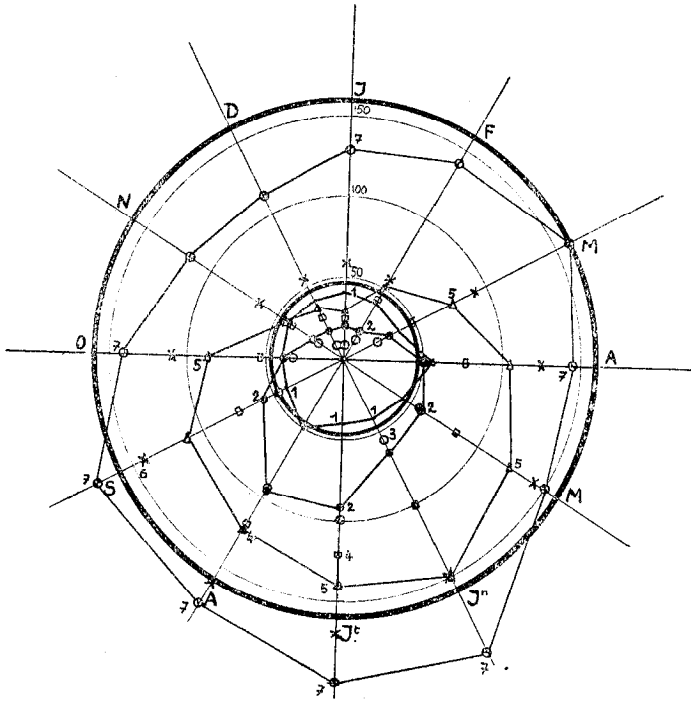


Figure 6. — Valeurs de la contrainte le matin à 7 heures.

Les valeurs de la contrainte à Alger, Médéa, Djelfa, Laghouat, El-Goléa, In-Salah, Tamanrasset, sont représentées sur le diagramme polaire des douze mois par les points marqués 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7. On a tracé les cercles concentriques de contraintes 50, 100 et 150 en traits fins. On a dessiné, en traits forts, les cercles de contraintes 48 et 162 qui représentent les limites humides et sèches des climats d'égal confort pour l'homme (voir page 92). C'est dans l'anneau compris entre ces deux cercles que se placeront les points représentatifs de contraintes hydriques des atmosphères confortables pour la vie humaine.

Il résulte bien clairement de ces figures que la contrainte de l'eau dans l'atmosphère d'Alger, reste à très peu de choses près (surtout le matin à 7 h.), celle de l'air en équilibre avec l'eau de la Méditerranée. Par suite de la contrainte de cette eau, le climat d'Alger est plus sec en hiver, de fin novembre à février que celui de Laghouat. En été, par contre, d'avril à octobre, le climat saharien reprend ses droits. Médéa, Djelfa ont des climats intermédiaires, avec des contraintes d'hiver extrêmement faibles.

Dans le Sahara, les contraintes de l'eau atmosphérique sont, évidemment, beaucoup plus élevées. Nous noterons cependant, que de même que le climat d'Alger apparaît comme tributaire d'eaux fixées à la contrainte 33, le climat de Tamanrasset apparaît comme tributaire d'eaux fixées à une contrainte voisine de 100. Serait-ce là la contrainte moyenne des sols du désert soudanais ?

Nous ne pousserons pas plus avant, dans ce travail, l'étude de la contrainte de l'eau dans l'atmosphère algérienne. Nous nous réservons de revenir sur cette question dans une étude spécialisée.

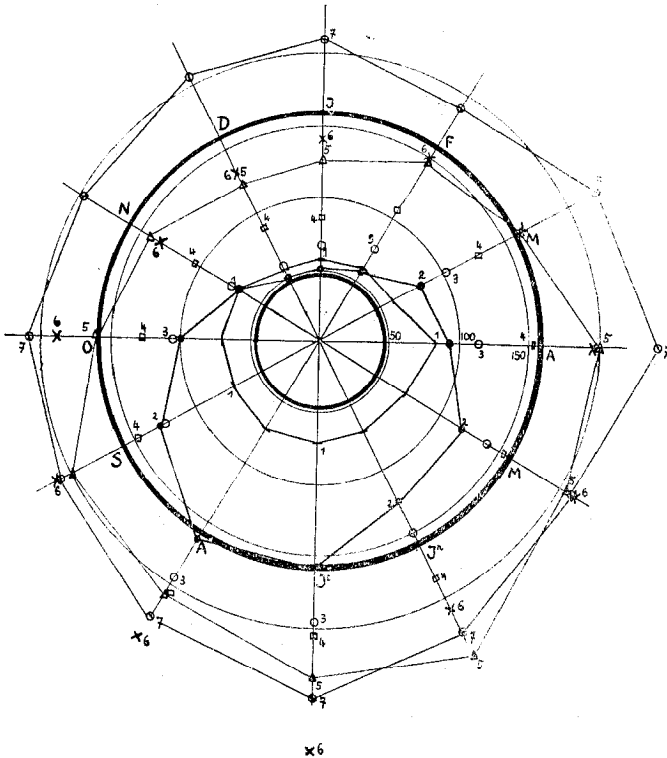


Fig. 7. — Valeurs de la contrainte à 13 heures.

Les notations des climogrammes polaires sont celles de la figure 6.

Notre intention a été de montrer la commodité de la notation en contraintes pour expliquer certains phénomènes climatiques, à priori paradoxaux comme la sécheresse relative de l'air au bord immédiat de la mer.

L'étude détaillée de la contrainte atmosphérique conduit à d'autres constatations, par exemple à l'influence considérable de dispositions locales, orientations des collines par rapport aux vents dominants, voisinage de massifs forestiers, resurgences d'eaux vives, etc... Cette méthode fait ressortir ces caractères locaux, c'est une des raisons pour lesquelles elle peut être particulièrement précieuse.



## LE BIEN-ETRE DE L'HOMME

Nous allons, maintenant, appliquer l'idée de contrainte à la recherche des climats convenant à l'homme.

On sait qu'à la suite des travaux de Maurice Vinot (15) des recherches considérables ont été entreprises pour déterminer quels sont les climats les plus agréables à l'homme placé dans des conditions déterminées, comme au repos, l'été, au travail l'hiver, etc... La méthode d'investigation a été la méthode statistique, c'est-à-dire que l'on a interrogé un nombre élevé de personnes sur leurs sensations de confort lorsqu'elles se trouvaient dans des locaux dont l'atmosphère était « climatisée » d'une façon connue. La moyenne des réponses a permis de classer les atmosphères selon la sensation moyenne d'agrément ressentie par l'homme moyen.

Cette méthode est valable pour déterminer des climats de bon confort. Nous nous permettrons de remarquer que sa valeur pour déterminer si un climat est sain ou malsain est nulle. Il peut y avoir des climats agréables malsains, et des climats désagréables sains, aussi ne considérerons-nous pas cette question au cours de cet exposé.

Nous reproduisons (fig. 8) le diagramme classique en U.S.A. dit ASHVE CONFORT CHART indiquant les climats d'été et d'hiver agréables à l'homme selon les statistiques américaines les meilleures (16).

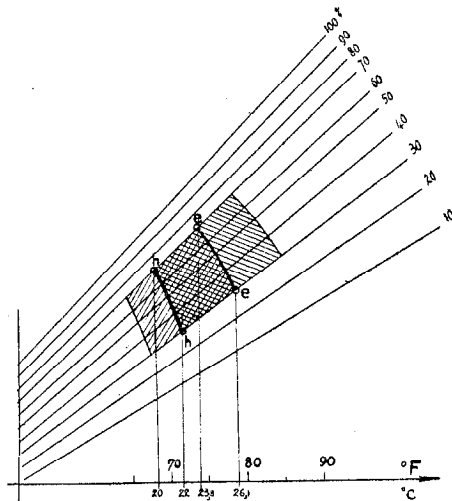


Fig. 8. — Diagramme des climats d'égal bien-être de l'Homme d'après A.S.H.V.E. Comfort Chart. (American Society Heating and Ventilating Engineers).

On lit sur ce diagramme que l'état hygrométrique agréable est compris entre 30 et 70 % (les auteurs français donnent 40-80 %) avec de 74° F à 79° F. (centigrades 23°3 — 26°1) l'été et 68° F — 72° F (centigrades 20° — 22°2) l'hiver.

(15) VINOT. — Agenda Dunod : Physique Industr., p. 131.

(16) CARRIER, CHERNE, GRANT. Modern Air conditioning, p. 14.

Transformons ces valeurs en contraintes par la formule :

$$C = \frac{18,86}{18} (273 + t) \log. \frac{100}{E}$$

il vient :

Eté .....	48,1	< C <	164
Hiver .....	47,5	< C <	160

Les chiffres sont assez proches pour que nous considérons comme limites du confort, les valeurs :

$$48 < C < 162$$

dont la moyenne géométrique est :

$$(48 \times 162)^{\frac{1}{2}} = 88$$

Appliquons ces valeurs aux climats de l'Algérie. Si nous reprenons les fig. 4 et 5, nous voyons que le climat d'Alger, comme de toute la zone littorale est, sauf aux heures ensoleillées, constamment humide.

A l'intérieur des terres, les humidités excessives de la nuit se rachètent par un bon climat de jour. L'impression de l'homme qui travaille à l'extérieur le jour, et rentre la nuit, est de se trouver en moyenne, soumis à un climat nettement plus sec que sur la côte. Notons que pour le végétal, pendant la période d'hiver, c'est inverse. Pendant l'été des siccités excessives sont atteintes. De nuit l'atmosphère de Laghouat dégage le supportable en juillet et août. A Djelfa, le climat de nuit est nettement meilleur. Seules quelques nuits de première quinzaine d'août sont insupportables. A Médéa, les nuits sont toujours bonnes. Nous constatons que le résultat des calculs correspond bien aux sensations de la moyenne de la population européenne. Elle quitte, en général, Laghouat pour Djelfa dès les premiers jours de juillet pour revenir fin août. Ainsi l'étude de la contrainte climatique permet de prévoir et de justifier les besoins de la population européenne.

Si nous appliquons ces mêmes données aux climats sahariens, nous trouvons cette contrée insupportable de mai à septembre, et ayant des nuits fort humides en décembre, janvier, février, ce qui répond bien à la réalité.

Cet examen sommaire de la question nous permet de dire qu'il existe un parallélisme étroit entre les climats considérés comme d'égal confort, et les climats isanankes. Ainsi, l'introduction de la notion de contrainte dans l'étude des atmosphères climatées apporte une simplification considérable en permettant de substituer aux deux paramètres indépendants température, humidité, le paramètre unique contrainte.

### LA CONTRAINTE DE L'EAU DU SOL

La fixation de l'eau dans les sols végétaux a fait l'objet de nombreuses études. La question cependant paraît loin d'être résolue.

On sait que si on laisse se dessécher un sol arable, il arrive un instant où la plante qui y pousse fane. On dit alors que le point de fanage de cette plante est atteint.

Si l'on fait cet essai avec une même variété plantée dans des sols différents et mesure, à l'étuve, l'humidité de ces sols aux points de fanage, les humidités apparaissent extrêmement différentes. Aussi, a-t-on eu idée d'étudier non la quantité d'eau retenue par le sol, mais la force de fixation,

c'est-à-dire la grandeur de la pression ou de la dépression nécessaires pour extraire l'eau. A ce moment, on s'aperçoit que les points de fanage correspondent, pour une même plante, dans des sols différents, à des forces de fixation de l'eau de même grandeur.

Il y a une analogie étroite entre cette méthode d'étude de l'eau du sol, et l'étude de la contrainte.

Appelons L la hauteur mesurée en cm. de la colonne d'eau exerçant une succion sur le sol suffisante pour faire sourdre l'eau. La contrainte de l'eau du sol, travail évalué en Kgm. pour 100 gr., nécessaire pour extraire l'eau est :

$$C = \frac{L}{1.000} \cdot \frac{100 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^2}$$

$$C = \frac{L}{1.000}$$

Après SCHOFIELD (17) dont les travaux sur cette question ont fait école, on a convenu de représenter la force de succion, non par la grandeur L mais par son logarithme vulgaire, et de donner à ce signe le nom de pF. Nous critiquerons plus loin cette forme, étudions d'abord la correspondance entre pF et la contrainte.

Par définition  $pF = \log. L \text{ cm. d'eau}$ ,

d'où  $pF = \log. 1.000 C = 3 + \log. C$ .

Généralement, la hauteur de succion n'est pas déterminée directement. On mesure l'abaissement  $\Delta$  du point de congélation (BOUYOUCOS) (18) de l'eau dans le sol. Admettons que ce chiffre puisse être déterminé :

D'après Schofield, nous avons

$$pF = 4,1 + \log \Delta$$

En effet, effectuons le calcul en utilisant les valeurs classiques de VANT'HOFF :

$$m \Delta = \frac{To2 k}{C E}$$

T température absolue du point de congélation (273°).

C Chaleur latente de fusion du solvant (80).

R Constante des gaz parfaits (848).

E Equivalent mécanique de la calorie (426).

m Concentration moléculaire du corps dissous par 1.000 gr. solvant.

Nous avons :

$$m \Delta = 1^{\circ}858 \text{ (LEWIS)}$$

(17) R. K. SCHOFIELD. — Transactions of the First Commission of Soil Science. Vol. A, 1938.

— Bouyoucos G. J. (1936). J. Amer. Soc. Agron. 28, 581.

(18) R. K. SCHOFIELD and J.V. Botelho da Costa. — Journ. of Agric. Science XXVIII, IV, oct. 1938.

La force de retenue de l'eau pour le milieu d'abaissement cryoscopique  $\Delta$ , est la pression osmotique. Evaluons-là, comme SCHOFIELD, en cm. d'eau. Il vient, d'après la loi de VANT'HOFF à 0° :

$$m L = 22,9. 1.000$$

Eliminons m entre ces deux relations :

$$\frac{L}{\Delta} = \frac{22,9. 1.000}{1,858}$$

$$pF = \log. L = 4,09061 + \log. \Delta \quad (1)$$

chiffre très voisin de celui de SCHOFIELD.

Prenons les chiffres donnés par divers auteurs pour le point de fanage du haricot. Ils hésitent entre :

	pF = 4,25		
et	pF = 4,28		
Pour	pF = 4,25	L = 17800	C = 17,8
Pour	pF = 4,28	L = 19100	C = 19,1
	d'où un écart de 7 %.		

Examinons encore un autre exemple de SCHOFIELD. Pour des sols passés à l'étude :

	à	100°	105°	110°
pF		6,90	6,93	6,95
L		$7,96 \times 10^6$	$8,52 \times 10^6$	$8,92 \times 10^6$
C		$7,96 \times 10^3$	$8,52 \times 10^3$	$8,92 \times 10^3$

Pour une raison de pur principe nous préférons personnellement la notation numérique en contrainte à celle en pF. Par contre dans le tracé de nos diagrammes nous utilisons toujours log. C. c'est-à-dire pF à une constante près. La notion de contrainte permet d'étudier l'état de l'atmosphère en équilibre avec le sol, par exemple au point de fanage.

Si nous admettons C = 18 pour le point de fanage du haricot, nous voyons que l'atmosphère en équilibre avec ce sol, l'atmosphère isananke pour t = 20° à l'état hygrométrique de 80 %, pression de vapeur 18 Mb. C'est un air très humide.

Nous pourrions, si nous connaissions les contraintes de fanage des diverses espèces végétales, déterminer les états hygrométriques de l'atmosphère correspondants. Les chiffres établis par BOUYOCOS et SCHOFIELD montrent que la contrainte de fanage correspond, pratiquement toujours, à des humidités atmosphériques élevées. Les terres cultivées se dessèchent, donc, sous leur climat moyen et sans les apports d'eau par voie pluviale, ou par irrigation, toute culture apparaît impossible.

On ne connaît la valeur du point de fanage que de très peu d'espèces végétales.

Par exemple, nous avons vainement cherché des précisions sur le point de fanage du blé ou de la vigne. C'est que la méthode du point de fanage se heurte à trois difficultés, pratiquement insurmontables :

1° Il est extrêmement difficile de savoir à quel instant un végétal commence à faner, et ce point dépend non seulement de la plante, mais aussi de ses modes de culture antérieurs.

2° Il est impossible de prélever à ce moment un échantillon moyen du sol.

3° La mesure de l'abaissement cryoscopique de l'échantillon fournit la force de rétention de l'eau au voisinage de 0°, mais non pas à la température où s'effectue la culture et la relation entre ces deux valeurs est inconnue.

Ces difficultés font que, malgré la valeur théorique de l'idée de SCHOFIELD et les beaux travaux de la Station Expérimentale de Rothamsted, les connaissances sur l'eau des sols arables sont encore insuffisantes.

Nous poursuivons, actuellement, des recherches par d'autres méthodes. Au lieu de mesurer l'abaissement cryoscopique, nous cherchons à mesurer la pression de vapeur de l'eau du sol ou de l'air en équilibre avec lui (19). Cette mesure est possible par des procédés simples, à la température réelle. Notre formule fondamentale permet d'en déduire la contrainte de l'eau, c'est-à-dire  $L$  et le  $pF$  si on tient à cette notation.

Au lieu de déterminer le point de fanage, nous proposons de déterminer les climats de bien-être de la plante en comparant des conditions de culture dans des sols différents, ce qui paraît pratiquement aisé. Nous pensons même qu'il ne serait pas impossible de déduire de mesures directes et d'études de la physiologie du végétal ses climats de confort maximum (20).

Ces méthodes nous semblent seules capables de permettre une étude de l'eau du sol et des conditions optima à réaliser dans les cultures.

## CONSERVATION ET TRANSFORMATION DES MILIEUX BIOLOGIQUES

La notion de contrainte hydrique va, dans le domaine de la conservation des milieux biologiques et dans les problèmes de leurs transformations éventuelles, rencontrer des applications importantes. On a souvent, dans la pratique, à rechercher les conditions les meilleures pour maintenir, le plus longtemps possible un milieu vivant dans un état aussi peu déformé que possible. Il s'agit ici, de l'immense question de la conservation en état « frais », et de la recherche du climat « d'égal bien-être » propre à assurer cette conservation. Nous touchons, en particulier, la question de la conservation de matières végétales propres à une reproduction végétative et de la conservation de substances délicates qui doivent être amenées fraîches sur des marchés de consommation. Certaines questions de transformation ne jouent que sur les équilibres hydriques, par exemple, les industries de déshydratation. Nous examinerons très rapidement ces deux sujets, et nous indiquerons comment la notion de contrainte intervient.

La vie végétale exige, pour être assurée, le maintien de l'être dans des conditions physico-chimiques bien déterminées. Particulièrement la température ne doit varier que dans un intervalle bien défini. Pour un système de vie déterminé, existe une température optimum correspondante au maximum vital. Il existe pour ce système des températures extrêmes, chaudes et froides. Sous l'action de la chaleur, on aboutit à la pasteurisation pour des températures assez peu élevées (environs de 60° C), et à la stérilisation qui met en œuvre des températures plus élevées (100° et au-dessus).

---

(19) M. le Dr E. W. Russell de Rothamsted Experimental Station. — Nous avons la satisfaction d'y voir que ces mêmes idées ont été exposées avant cette étude, par exemple dans le travail : A. L. C. Davidson and R. K. Schofield. « Measurement of the suction of soil water by Portland stone absorbers calibrated by a new method for determining vapour pressures near to saturation ». (August 1942.)

(20) Les bases bio-physique et les procédés de mesure de ces paramètres seront exposées dans la thèse de l'un de nous, travail actuellement soumis à l'Université d'Alger.

Du côté, des températures basses, il y a symétrie de conception. Les températures de l'ordre de 0° C et environ, qui rappellent la pasteurisation, puis les températures bien inférieures à 0° qui elles conduisent à la congélation. Là encore, deux domaines à expliciter. Seules, pour le moment, les températures de l'ordre de 0° C figureront dans notre travail, parce qu'elles aboutissent pratiquement à la recherche du climat en équilibre avec la substance à cette température. Disons aussi, que ces températures très voisines de 0°, nous permettent la seule approximation possible en l'état actuel de la question. Ceci est dû au fait que vers 0°, nous possédons quelques mesures cryoscopiques, qui nous permettent d'illustrer notre conception.

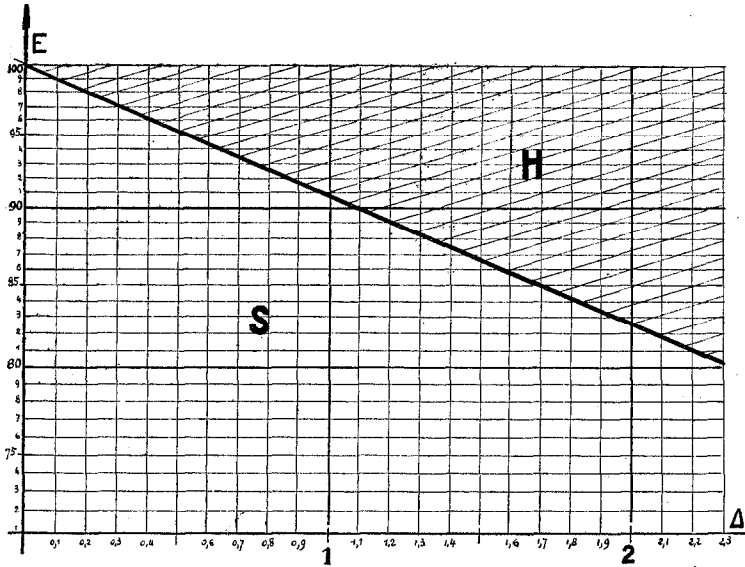


Fig. 9. — Détermination graphique de l'état hygrométrique E de l'air isananke à 0°C, en fonction du point de congélation Δ de la substance à conserver. Pour une valeur de Δ en abscisse on trouve sur la droite la valeur de l'état hygrométrique cherché. La région (S) est une zone où il y a séchage. La zone (H) est celle qui correspond à l'humidification de la substance conservée.

Par exemple, si nous connaissons la contrainte C d'un substance pour une température d'équilibre à maintenir soit t°, nous pouvons immédiatement calculer l'état hygrométrique de l'air humide présumé conserveur. Le problème se résoud facilement à 0° C. Dans ce cas, il est possible d'admettre l'approximation de proportionnalité entre l'abaissement cryoscopique et la contrainte. Ce qui, disons-le encore, n'est plus exact à une température conservatrice de t° trop éloignée de 0. Ainsi par t. voisin de 0° (de l'ordre de quelques degrés au-dessus et au-dessous), nous aurons toujours la relation type fondamentale, qui demeure sensiblement valable :

$$(1,033) (11,9) \Delta = (1,084) (273) \log. \frac{100}{E}$$

d'où  $\log. E = 2 - 0,04157 \Delta$

Cette relation simple et le diagname de la figure 9 qui en résulte nous permet de déterminer l'état hygrométrique E de l'air d'équilibre de vie avec la substance dont on connaît l'abaissement cryoscopique Δ, et cela à 0° C, ou

à des températures extrêmement poches. La formule peut être remplacée par un diagramme d'emploi plus commode. Dans le plan cartésien semi-logarithmique, la courbe d'équilibre est une droite. Il suffira, connaissant l'abscisse  $\Delta$ , de lire sur la ligne, la valeur en ordonnée, de  $E$  cherché. Ce schéma est simple, commode. La droite coupe le plan en deux régions. Celle qui est inférieure, et vers l'axe des abscisses définit des valeurs de  $E$ , capables de déshydrater la substance ; celle du dessus, à des valeurs de  $E$  qui amènent l'humidification de la matière. Ainsi du lait exposé à 0°, dans une chambre aérée, a un  $\Delta$  de 0,514 (HAMBURGER) à 0,55 (ECKLES, COMBS et MACY) (21), ce qui donne pour état hygrométrique idéal des valeurs comprises entre 85,2 et 95 p. 100. Aussi, par exemple, un jus de raisin,  $\Delta = 2,516$  (CARAVA) demandera, exposé librement à 0°, un état hygrométrique de 78,5. Si ce jus était placé dans l'atmosphère du lait, à 95 p. 100 d'humidité relative il absorberait de l'eau. Par contre, à 78,5 p. 100 de valeur de  $E$ , le lait à 0° perd de l'eau.

L'entreposage réfrigéré des fruits et des légumes permet une application intéressante de notre idée. Si on place ces denrées sous régime du froid c'est pour leur maintenir un aspect vivant « d'origine » pendant un certain temps. Nous imaginons qu'il s'agit de fruits ou de légumes parfaitement sains et sans blessures. On abaisse la température de façon à limiter les actions enzymatiques propres, le plus possible ; en tous cas à les ralentir fortement. D'autre part, on cherche soit à maintenir la denrée à poids constant, soit au contraire à la déshydrater partiellement dans son entreposage. Ces desiderata ont leur raison d'être pratique, mais nous ne saurions traiter ici ce problème.

Limitons nous, volontairement à la recherche du climat conservateur d'équilibre théorique. Connaissant  $\Delta$  du légume, nous aurons à 0° l'état hygrométrique. Nous figurons (Tableau I), tout un ensemble calculé de cette manière. Par exemple, à 0° ou à des températures très voisines, l'artichaut qui en moyenne a un  $\Delta$  de 1,61, nous donne avec la notion de contrainte, un air d'équilibre dont l'état hygrométrique calculé est de 86 p. 100. CARRIER donne le chiffre pratique 82. A cette valeur l'artichaut perd du poids. La betterave, a des  $\Delta$  qui vont, suivant les variétés, l'époque, de 2,94 à 2,66, ce qui donne à 0° des climats d'état hygrométrique compris entre 76,0 et 78,0 p. 100. CARRIER indique patiquement 78 p. 100.

Nous indiquons dans le tableau les valeurs de la température de congélation  $\Delta$  de certains légumes, d'après les déterminations du Bureau of Plant Industry, et publié aux U.S.A. par le Département d'Agriculture, dans la circulaire 447 (23). Dans ce tableau, on donne les valeurs moyennes de  $\Delta$ , les valeurs maxima et minima. A côté, nous indiquons la valeur de l'état hygrométrique de l'air d'équilibre très près de 0° calculé par notre procédé. Dans les 3 dernières colonnes, nous indiquons les valeurs préconisées par les expérimentateurs et les spécialistes CARRIER, SCUPIN (24) et WILLIAMS (25). L'examen de ces chiffres montre d'abord certaines divergences dans les valeurs pratiques indiquées pour une même matière passant pour le concombre de 75 (CARRIER) à 90 (WILLIAMS). Nos chiffres calculés sont en général tout à fait dans l'ordre de grandeur des valeurs pratiques admises, ce qui déjà plaide en faveur du raisonnement tenu. Mais, il y a plus, ils permettent d'apporter un élément de contrôle et d'explication des chiffres pratiques eux-mêmes. Ainsi nous calculons pour le concombre des états hygrométriques compris entre 91,5 et 93,0 p. 100 pour l'air d'équilibre. Avec les

(21) MILKAND MILK PRODUCTS. Mac. Graw. 1942. p. 372.

(22) VLES loc. cit., p. 134.

(23) Cité par R.C. Wright (Refrig. and Air. Condit., avr. 1938, p. 15-19).

(24) SCUPIN L. Die Kalte. — Ind. mens. avril 1938, p. 25-27 et 41-42.

(25) W. WILLIAMS. — In and Refrig. 1936, p. 382.

TABLEAU I

	I	1	II	2	III	3	IV	V	VI	VII
Artichaut .....	— 1,61	86	— 1,61	86	— - ,61	86	82	—	—	—
Topinambour .....	— 2,49	79,1	— 2,66	78	— 2,27	80,8	—	—	—	—
Asperges .....	— 1,22	89	— 1,45	87,4	— 1,05	90,5	81	—	85	85-90
Haricots verts .....	— 1,28	88,7	— 1,33	88,2	— 1,05	90,5	75	—	85	85-90
Haricots en cosses ..	— 1,00	91	— 1,16	89,6	— 0,98	91,1	—	—	—	—
Betteraves .....	— 2,83	76,7	— 2,94	76,0	— 2,66	78,0	78	—	—	—
Chou (précoce) .....	— 0,44	95,7	— 0,50	95,2	— 0,38	96,5	79	85	85	90-95
Carotte .....	— 1,33	88,2	— 1,45	87,3	— 1,28	88,7	81	—	85	—
Chou-fleur .....	— 1,05	90,5	— 1,16	89,6	— 1,05	90,5	85	—	85	—
Céleri .....	— 1,28	88,7	— 1,28	88,7	— 1,10	90,1	79	90	90	90-95
Echalotte.....	— 1,10	90,1	— 1,28	88,7	— 0,89	92,0	—	—	—	—
Concombre .....	— 0,83	92,5	— 0,94	91,5	— 0,77	93,0	75	—	90	—
Aubergine .....	— 0,89	92,0	— 1,00	91	— 0,72	93,5	75	—	—	—
Ail .....	— 3,66	70,0	— 4,11	68,6	— 3,49	72,0	—	—	—	—
Navet .....	— 1,10	90,1	— 1,28	88,7	— 1,00	91	80	—	85	—
Poireau .....	— 1,55	86,4	— 1,94	83,2	— 1,22	89	—	—	—	—
Cantaloup chair .....	— 1,67	85,5	— 1,99	83,0	— 1,39	87,8	80	—	—	—
Cantaloup écorce ..	— 1,99	83,0	— 2,22	81,2	— 1,22	89	—	—	—	—
Oignons doux .....	— 1,10	90,1	— 1,28	88,7	— 1,05	90,5	80	80	87	—
Oignons forts .....	— 1,05	90,5	— 1,28	88,7	— 0,94	91,5	—	85	—	—
Pois en cosses .....	— 1,10	90,1	— 1,15	89,7	— 1,39	92,0	80	—	85	—
Poivrons verts .....	— 1,05	90,5	— 1,16	89,5	— 0,94	91,5	80	—	—	—
Pommes de terre.....	— 1,72	85,0	— 1,78	84,5	— 1,67	85,4	79	—	83-90	85-90
Patates .....	— 1,94	83,2	— 2,16	81,6	— 1,83	84,2	70	—	—	—
Tomates .....	— 0,89	92,0	— 1,00	91,0	— 0,72	93,5	72	—	82	—

I :  $\Delta$  moyen.

II :  $\Delta$  maximum.

III :  $\Delta$  minimum.

1 : Etat hygrométrique moyen.

2 : Etat hygrométrique du maximum.

3 : Etat hygrométrique du minimum.

IV : Valeurs expérimentales de l'état hygrométrique déterminées par Carrier.

V : — — — — — Scrupin.

VI : — — — — — Williams.

VII : Valeurs citées par Prescott (Food Technology) et extraits de U.S. Dept.

Agr. Bull. 278.



chiffres de 75 (CARRIER) et 90 (WILLIAMS) l'atmosphère amène la perte d'eau du concombre, mais nous voyons vite que dans la conservation CARRIER à 75 en perdra plus que dans la conservation WILLIAMS à 90, chiffre déjà très voisin de notre calcul théorique.

Nous insistons bien sur le caractère théorique de nos calculs. Il est bien évident que seule la connaissance exacte, mesurée, de la contrainte hydrique de la substance à conserver à la température choisie, nous donnera la valeur tout à fait convenable de l'état hygrométrique. Ceci est encore très vrai pour les fruits dans lesquels il convient de chercher la contrainte hydrique de façon à obtenir équilibre avec l'air. Ainsi, la peau d'orange donne des abaissements cryoscopiques allant de 2,83 à 2,10, ce qui donne pour état hygrométrique des valeurs comprises entre 76,6 et 82,0 avec une valeur moyenne de 78,6. Dans ce cas, vers 0°, CARRIER donne un état hygrométrique pratique de 80. Somme toute, notre approximation est assez satisfaisante. Nous joignons, ici, sous toute réserve, tant que la contrainte exacte expérimentale ne sera pas établie, les valeurs calculées pour les fruits comme nous l'avons fait pour les légumes.

Un problème parallèle au précédent serait celui dans lequel on chercherait à établir le climat idéal d'équilibre capable de ne pas permettre l'évolution de parasites cryptogamiques. Ainsi, il a été expérimentalement démontré qu'une solution sucrée à 70 p. 100 de teneur en sucre ne permettait pas un développement marqué de *saccharomyces*, voire des levures en général. Une solution de ce type, possède un abaissement cryoscopique proportionne à la solution mol-normale, et que l'on peut évaluer à  $\Delta = 3,831$ . Ce milieu, à 0°, devra alors faire équilibre à un air dont l'état hygrométrique calculé ou pris sur l'abaque se trouve être égal à 69,24 p. 100. Ce qui porte à penser que, dans la lutte parasitaire du type levure, ce sont des airs humides à 69 p. 100 d'humidité relative qui, à un entreposage à 0° répondront à la question. Ceci nous donne l'ordre de grandeur qui dans une conservation prolongée permettrait les reproductions végétatives non dégradées par infections parasitaires.

Dès que la question de l'entreposage s'écarte notablement d'une température de 0° C, il convient de se retourner vers la détermination expérimental de la contrainte C. Ce travail ainsi qu'il en a été fait des allusions au cours de ce mémoire, est entrepris, et, les pouvoirs inducteurs spécifiques en haute fréquence paraissent nous apporter des indications précieuses.

L'application de la notion de contrainte à la déshydratation des substances vivantes, fournit des données très intéressantes. Ici, plus encore que dans le cas précédent, la contrainte doit être mesurée à la température souvent élevée de l'opération (jusqu'à 70°). Une grossière approximation permet déjà d'entrevoir la souplesse et l'intérêt de cette notion.

L'expérience nous a démontré, et des mesures en hautes fréquences (26) ont abouti à expliciter le rôle des opérations de blanchiment préalable des légumes par exemple. C'est ainsi que, à côté des destructions enzymatiques cette opération industrielle classique a pour résultat une diminution sensible de la contrainte hydrique du milieu. Tout semble se passer comme si, par traitement à la vapeur, l'eau se trouve à l'intérieur du produit partiellement « déliée ». En tous cas le produit blanchi accuse une proportion accrue d'eau « libre » plus importante que celle du produit naturel. Nous savons aussi que, dans la première phase de la déshydratation, il y a un phénomène sensiblement comparable à l'évaporation de l'eau libre dans l'atmosphère, et ceci jusqu'à une teneur hydrique correspondant à ce que l'on dési-

---

(26) La technique de ces mesures fait l'objet de la thèse de l'un de nous actuellement soumise à l'Université d'Alger.

TABLEAU II

	I	1	II	2	III	3	IV	V	VI
Pommes :									
Variété d'été .....	— 1,99	83	— 2,16	81,6	— 1,89	83,7	79	90	
Variété automne et hiver..	— 1,94	83,2	— 2,10	82	— 1,78	84,6			
Variété sauvage .....	— 2,72	77,5	— 2,83	76,7	— 2,49	70,0			
Bananes :									
Peau, non mure .....	— 1,22	89,0	— 1,22	89,0	— 1,16	89,5			
Fulpe, non mure .....	— 1,00	91,0	— 1,05	90,5	— 0,77	93,0			
Peau mûre .....	— 1,45	87,2	— 1,61	86,0	— 1,39	87,8			
Fulpe mûre .....	— 3,33	72,5	— 3,66	70,0	— 3,05	75,0			
Agrumes :									
Pamplemousses chair .....	— 1,99	83,0	— 2,22	81,2	— 1,67	85,5	80		80-85
Pamplemousses pelure .....	— 1,99	83,0	— 2,22	81,2	— 1,89	83,8			
Kumquat .....	— 1,94	83,2	— 2,27	80,9	— 1,78	84,5			
Citron, chair .....	— 2,16	81,6	— 2,27	80,9	— 1,94	83,2			
Citron, pelure .....	— 2,10	82,0	— 2,27	80,9	— 1,99	83,0			
Limon, persan .....	— 1,50	87	— 1,61	86,0	— 1,39	87,8			
Orange, chair .....	— 2,22	81,2	— 2,23	81,2	— 1,99	83,0	80		80
Orange, pelure .....	— 2,55	78,6	— 2,83	76,6	— 2,10	82,0			
Mandarine, chair .....	— 1,56	86,3	— 2,33	80,2	— 2,38	79,8			
Satsuma, Owari, chair .....	— 2,10	82,0	— 2,27	80,8	— 1,83	84,1			
Figues, mission .....	— 2,72	77,4	— 3,16	74,0	— 2,44	79,3	75		
Raisin, type américain .....	— 2,49	79,0	— 2,66	78,0	— 2,33	80,2	80		
— type européen .....	— 3,94	68,0	— 4,27	66,0	— 3,60	71,0			
Poires .....	— 2,38	80	— 2,66	78	— 2,22	81,2	80	90	85
Pêches .....	— 1,45	87	— 1,67	85,4	— 1,23	88	86	90	85
Prunes .....	— 2,22	81,5	— 2,38	80	— 2,05	82,5	80	85	

I :  $\Delta$  moyen.II :  $\Delta$  maximum.III :  $\Delta$  minimum.

1 : Etat hygrométrique moyen.

2 : Etat hygrométrique du maximum.

3 : Etat hygrométrique du minimum.

IV : Valeurs expérimentales établies par Carrier.

V : Valeurs citées par L. Scopin (Die Kälte. Ind. 1938. mars et avril.

VI : Valeurs citées par Prescott (Food Technology). Mac. Three Book Company, 1937, p. 460.

gne sous le nom de point de saturation des fibres. Pendant cette première phase, la notion généralisée de contrainte, même avec les mesures déficients et les interpolations grossières sur ces données cryoscopiques nous fournit certains chiffres qui expliquent d'une manière séduisante les résultats expérimentaux. Il est entendu que nous n'envisageons que la phase initiale du phénomène. Après le point de saturation des fibres, la contrainte est tout autre que celle que nous pouvons évaluer en l'état actuel de nos travaux.

Soit une pomme de terre. Son abaissement cryoscopique  $\Delta = 1,72$  de moyenne. Ce chiffre, à  $0^\circ$ , représente une contrainte de 20 environ. Cette contrainte isotherme représente théoriquement l'équilibre. En présence d'un air parfaitement calme, l'évaporation pomme de terre-air ne se produira que pour une contrainte de l'air au contact supérieure à 20. Et, l'évaporation sera d'autant plus importante que la marge de contrainte sera élevée. Déjà, nous voyons comment se présente ce départ initial de l'eau de la pomme de terre blanchie à déshydrater dans un endroit déterminé, par temps calme. En utilisant les chiffres cités dans notre exposé sommaire du climat géographique nous voyons que la contrainte, à 7 h., 13 h., 18 h., à Alger, Orléansville, Relizane, sont dans l'ordre, au mois de juin : pour Alger, 47, 70, 47, pour Orléansville 50, 150, 125, pour Relizane 48, 128, 100. Donc, en chacun de ces trois lieux, la pomme de terre initiale de contrainte hydrique d'environ 20, va se deshydrater dans sa phase initiale. Mais ce sera Orléansville qui représentera le climat moyen de contrainte la plus élevée des trois stations. Ce sera donc l'endroit où la pomme de terre se deshydratera, dans sa première phase toujours, le plus rapidement. Et, on note par exemple, qu'à Orléansville, la deshydratation sera plus aisée qu'à Relizane, station assez voisine.

Un cas plus caractéristique se présente pour certains fruits. Ainsi par exemple, le raisin a un point de congélation  $\Delta = 3,94$  (raisin type européen). Ici, la contrainte calculée à  $0^\circ$ , est de l'ordre de 48 à 50. Si on se limite encore à la première phase, nous voyons pourquoi les capacités régionales de deshydratations naturelles sont variables. Ainsi, en août, les contraintes sont pour Alger 50, 70, 40 ; Orléansville 50, 161, 130 ; Relizane, 45, 155, 120. Nous voyons que Alger est tout juste le climat d'équilibre à 50 ; et que le départ d'eau dans la contrainte 70 de 13 heures est assez faible, tandis que le soir le produit se rehydrate. Au contraire, Orléansville et Relizane sont propices au séchage, avec encore Orléansville en tête.

Les éléments approximatifs de base permettront aussi l'examen industriel type, avec l'usage d'évaporateurs de types très divers. Ainsi, le début de la deshydratation de la pomme de terre de contrainte calculée de l'ordre de 20 environ, définit l'état hygrométrique initial que peut supporter le produit dans son traitement. Nous estimerons que le phénomène industriel utilisera de l'air de contrainte supérieure à 20, et pour cet équilibre à  $80^\circ$  nous trouvons sur l'abaque un état hygrométrique limite de 88 %. Nous pourrions donc choisir l'état hygrométrique inférieur ou égal à cette valeur pour assurer le départ initial de l'eau du produit. Pour le raisin, de contrainte 50, on trouvera pour  $80^\circ$ , une valeur de l'état hygrométrique de 74 %. Pour la première phase, avant le point de saturation des fibres, nous pourrions avec ces éléments, déterminer l'humidité limite des airs à employer, que nous résumons ainsi :

	A		Température de la phase initiale de séchage.		
	Moyen	C	50°	60°	70°
Topinambour .....	2,49	30	81,5	82	82,5
Haricots verts .....	1,28	18	90	90,3	90,7
Betteraves .....	2,83	35	79,4	79,8	80,5
Chou .....	0,44	8	96,4	96,5	96,7
Carotte .....	1,33	18	90	90,3	90,7
Aubergine .....	0,89	10	93	93,2	93,4
Navet .....	1,10	15	91,4	91,6	92
Noirceau .....	1,56	19	88	88,2	88,4
Oignons .....	1,10	15	93	91,6	92
Pois .....	1,10	15	93	91,6	92
Poivrons .....	1,05	15	93	91,6	92
Pommes de terre .....	1,72	20	87	87,2	87,6
Patates .....	1,94	24	85,3	85,7	86,1
Tomates .....	0,89	10	93	93,2	93,4
Pommes .....	1,99	26	85	85,3	85,8
Figues .....	2,72	35	80	80,5	81,0
Raisin américain .....	2,49	30	81,5	82,0	82,5
Raisin européen .....	3,94	50	72	73	74
Pêches .....	1,45	20	83,6	89	89,3
Poires .....	2,38	29	82,2	82,6	83,1
Bananes (pulpe) .....	3,33	40	75,5	76,2	77

Ces éléments permettent de définir les valeurs que l'humidité ne doit pas atteindre comme valeur supérieure. Ceci nous indique, du reste, pourquoi l'air de traitement ne sortira pas saturé, même après un temps indéfini. On voit qu'il faudrait tenir compte de ces données dans le calcul du rendement théorique et pratique des séchoirs.

### LES DETERMINATIONS D'HUMIDITE

Nous venons d'étudier l'équilibre de l'eau d'un milieu biologique avec l'eau de l'atmosphère extérieure. Ces considérations s'appliquent à tout phénomène de deshydratation.

En particulier, lorsque l'on porte à l'étuve un échantillon de matière en vue d'en déterminer l'humidité, si l'on assiste bien au départ d'une proportion importante de l'eau qu'il contient, on ne saurait en aucun cas atteindre une déshydratation totale. Au bout d'un temps infini, la contrainte hydrique de l'échantillon devient égale à la contrainte de l'atmosphère de l'étuve. On ne saurait aller au delà.

Calculons cette contrainte atmosphérique dans une étuve à 100°, 110°, 130°. Nous imaginerons dans un premier cas que l'atmosphère du laboratoire a une pression de vapeur de 10 Mb, dans un deuxième de 20 Mb, chiffres très souvent réalisés :

	100°	105°	110°	130°
10 Mb .....	734	822	864	984
20 Mb .....	668	784	744	900
Rapport .....	1,175	1,168	1,161	1,093

Ainsi, selon l'état atmosphérique, selon l'humidité du laboratoire, l'état du résidu dit sec, sorti de l'étuve est différent. Nous voyons dans cet état de choses une des raisons pour lesquelles les mesures d'humidité, telles

qu'on les pratique à l'heure actuelle, ne peuvent pas donner de résultat mathématiquement certain et même ne peuvent donner d'un laboratoire à un autre ou d'un jour à l'autre des résultats identiques. Les chiffres que nous donnons montrent qu'il y a intérêt, au point de vue reproductibilité, à opérer les dessiccations dans une étuve à température élevée. Est-ce là la raison de la vogue de la méthode de dosage de l'humidité, où la substance est abandonnée pendant une heure exactement, dans une étuve, préalablement portée à 130° ?

En soulevant le problème de la validité des mesures d'humidité, nous abordons une question de la plus grande importance pratique. Le commerce des céréales, l'industrie de la meunerie supposent que l'on sait définir l'humidité des grains.

Or, nous avons fait l'expérience suivante :

Nous avons pris des échantillons homogènes de variétés de blés différentes. Nous les avons abandonnés à la température ambiante dans une atmosphère sèche, puis mise en boîtes hermétiques lorsque l'humidité s'est trouvée ramenée à 10 % environ.

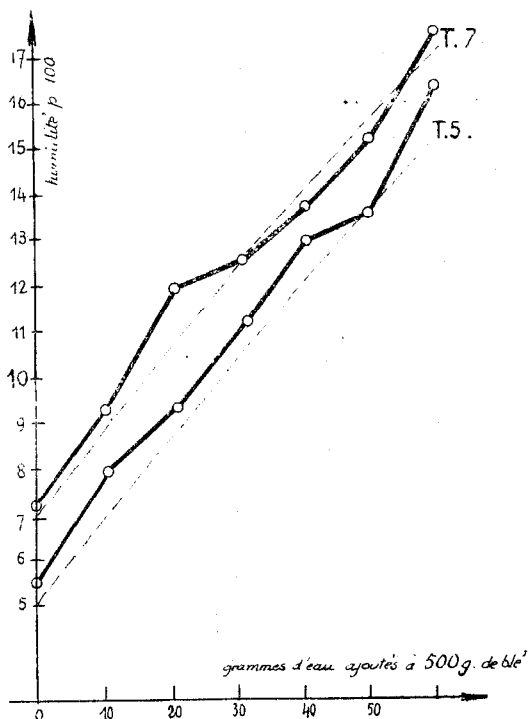


Fig. 10. — Les lignes hachurées sont les lieux théoriques des humidités obtenues par conditionnement du blé à 5 (5) et 7 (7) p. 100 d'humidité initiale.

Après quelque temps, nous avons pris de chaque variété, sept échantillons identiques qui ont été placés dans sept bocaux hermétiques, numérotés de 0 à 6. Le bocal n° 0 a été laissé tel. Le bocal n° 1 a reçu 10 gr. d'eau distillée, le n° 2, 20 gr., etc... Après homogénéisation et abandon un temps suffisant au conditionnement, les humidités ont été mesurées à l'étuve. Nous

avons calculé en partant de l'humidité supposée exacte du bocal 0, les valeurs d'humidité que nous devrions trouver dans les autres bocaux, et comparé les chiffres mesurés. La *fig. 10* montre les résultats obtenus. Il apparaît une erreur systématique dépendant de la variété.

Nous estimons que, dans l'étuve, à partir de 60°, l'amidon du grain s'hydrate pour former un corps nouveau, qui ne se décompose pas à la température de l'étuve. Ce corps se forme en proportions différentes selon que l'on parte de matières plus ou moins humides, portées plus ou moins rapidement à la température de 60°, et selon la nature de l'amidon. Cette cause d'erreur, s'ajoutant à la première que nous avons signalée, montre qu'il n'y a pas de chance, quelque perfection que l'on puisse apporter aux méthodes de dosage et aux étuves, d'obtenir par les procédés classiques des dosages d'humidité vraiment scientifiques.

Ces considérations nous ont conduits à étudier si on ne pourrait pas mesurer, avec une haute précision la contrainte de l'eau dans certaines substances comme les grains et les farines et en déduire leur humidité. A priori, ceci est impossible parce que la contrainte de l'eau apparaît changer fortement d'une variété de grains à une autre, l'aptitude à fixer l'eau étant différente.

Cependant, si l'on étudie d'un peu plus près la question, on s'aperçoit que, pour une même espèce il existe des zones d'humidité où la contrainte est indépendante de la variété, et dépend seulement de l'humidité. Cette condition est réalisée par exemple pour les blés ayant environ 8 % d'humidité.

Nous pouvons donc, imaginer une méthode de détermination de l'humidité parfaitement scientifique et reproductible. Voici comment nous envisagerons d'opérer. Prenons un échantillon de blé, nous mesurerons la contrainte de son eau, ce qui nous donnera grossièrement l'humidité, puis, à basse température, nous laisserons cet échantillon se déshydrater jusqu'à 8 % d'humidité environ, et mesurerons exactement la perte de poids. Nous mesurerons alors la contrainte exacte de l'eau de l'échantillon, et en déduirons l'humidité exacte. Puisque nous connaissons la perte de poids au cours de la dessiccation, il nous sera facile de calculer l'humidité primitive exacte.

Remarquons que cette manière d'opérer fournit un deuxième paramètre : l'affinité de l'échantillon de blé pour l'eau. En effet, cette grandeur résulte directement de la comparaison de la valeur de la contrainte de l'eau et de l'humidité de l'échantillon.

Les conceptions qui précèdent nous paraissent encore plus justifiées pour étudier l'humidité de substances plus complexes (fruits et légumes déshydratés).

## CONCLUSIONS

*L'étude que nous venons de présenter constitue un résumé succinct d'une partie des travaux intéressant directement l'agriculture poursuivis au laboratoire de biophysique créé par l'un de nous à l'Institut Agricole de l'Algérie.*

*Des travaux commencés à Copenhague et à Paris, en particulier sur les conseils de M. Lecomte du Nouy, n'ont pu être poursuivis pendant la guerre que dans des conditions fort difficiles. Les résultats actuels n'ont été obtenus que grâce à l'aide active du C.N.R.S., qui, en faisant placer l'un de nous en affectation spéciale et l'attachant à ses services, lui a permis de reprendre les travaux que la guerre avait interrompus.*

Nous n'avons fait, ici qu'un exposé très bref et élémentaire de la théorie de la contrainte de l'eau. Un ouvrage plus important est en préparation. Nous n'avons également fait qu'à peine allusion aux méthodes de mesure de la contrainte, question qui fera l'objet d'un autre travail.

Ce que nous avons surtout voulu souligner c'est l'importance dans les études portant sur l'eau et ses liaisons, d'une représentation thermodynamique générale, d'équations correctement établies, de nombres précis capables de définir les conditions d'équilibre des systèmes contenant de l'eau.

Ces expressions thermodynamiques, ces conditions d'équilibre, se trouvent explicitement contenues dans l'œuvre de DUHEM et ont été utilisées par VLES.

Nous n'avons l'impression d'avoir fait œuvre nouvelle qu'en utilisant systématiquement une même forme mathématique générale pour définir des équilibres quelconques et en faisant par là abstraction de leurs mécanismes.

Remarquons que, généralement, dans une étude de l'air humide on considère l'état hygrométrique, dans une étude de sol la force de succion, dans l'étude d'une plante la pression osmotique. L'une de ces grandeurs sera exprimé en calories, l'autre en cm. d'eau, la troisième en pression atmosphérique.

Nous entendons bien qu'il peut sembler, à priori, parfaitement indifférent qu'à l'intérieur d'une même technique on utilise un système d'unités ou un autre à la condition que l'on se comprenne. Mais, à chaque instant, dans les problèmes pratiques, ces techniques se chevauchent et se combinent. Nous avons vu plus haut qu'il était impossible de faire un calcul correct de séchoir à légumes en considérant l'eau des légumes comme de l'eau libre, de même il est impossible de comprendre les équilibres réciproques de l'atmosphère et de la mer, de l'atmosphère et du sol sans passer par la notion de contrainte. Nous devons dire que, dans nos propres recherches, l'introduction des calculs systématiques en contrainte nous a conduit, immédiatement, à apercevoir des relations auxquelles, à priori, nous ne pensions pas et qui n'auraient pu résulter que de laborieux calculs. Cela a été le cas, par exemple, pour l'étude des états hygrométriques qui doivent régner dans les chambres froides pour la conservation de produits déterminés. Il est, assurément, bien remarquable de constater que plus les recherches s'affinent, plus les auteurs multiplient les expériences, plus ils se rapprochent des chiffres théoriques que le calcul au moyen de la contrainte nous a permis de fixer à priori.

Si, du point de vue purement théorique, il est toujours souhaitable de définir un état d'équilibre par la grandeur du paramètre thermodynamique qui définit cet équilibre même, on voit que du point de vue purement pratique le gain est plus grand encore. C'est pourquoi il nous a paru bon d'attirer l'attention sur les modes d'expression que nous venons de décrire.

(Laboratoires de Biophysique et de Technologie, mars 1945).