

PIERRE CURÉ

**Évaporation et transpiration Action des alternances de sécheresse  
et d'humidité sur la structure des plantes**

*Annales de la faculté des sciences de Toulouse 4<sup>e</sup> série*, tome 5 (1941), p. 49-256

[http://www.numdam.org/item?id=AFST\\_1941\\_4\\_5\\_49\\_0](http://www.numdam.org/item?id=AFST_1941_4_5_49_0)

© Université Paul Sabatier, 1941, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de la faculté des sciences de Toulouse » (<http://picard.ups-tlse.fr/~annales/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques  
<http://www.numdam.org/>

# ÉVAPORATION ET TRANSPIRATION

ACTION DES ALTERNANCES DE SÉCHERESSE ET D'HUMIDITÉ

SUR LA STRUCTURE DES PLANTES

Par M. PIERRE CURÉ,

Agrégé des Sciences physiques, Professeur au Lycée de Tarbes.

---

## AVANT-PROPOS

En poursuivant les recherches qui font l'objet de ce travail, j'ai pensé témoigner ainsi ma gratitude à toutes les personnes dont j'ai reçu l'accueil le plus aimable et qui m'ont prodigué les conseils les plus éclairés.

C'est pour moi un plaisir autant qu'un devoir de les en remercier.

M. Gaussen, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, a bien voulu s'intéresser à mes travaux : ses conseils précieux et ses critiques avisées m'ont permis de mener à bien mes recherches.

Je dois remercier également M. le Recteur Deltheil et M. le Doyen Dop qui m'avaient encouragé à entreprendre ce travail et le Professeur Buhl qui m'a aidé pour l'impression.

M. Trochain m'a fourni avec empressement d'utiles renseignements.

Pour la partie expérimentale, M. Enjalbert a effectué la réalisation et la mise au point si délicate de mon appareil. M. Bouget, botaniste à l'Observatoire du Pic du Midi, et véritable encyclopédie de la région, m'a évité des pertes de temps pour la recherche des plantes.

Pour la partie météorologique, j'ai toujours trouvé le meilleur accueil à l'Observatoire du Pic du Midi, de la part de ses directeurs successifs : M. Dauzère, puis M. Baillaud, qui a mis à ma disposition les courbes des appareils enregistreurs. MM. Lutz et Taule m'ont fourni des renseignements.

Que tous veuillent bien trouver ici l'expression de ma reconnaissance.

# PREMIÈRE PARTIE

## Généralités.

---

### CHAPITRE I

#### Introduction.

#### 1. Complexité du milieu; impossibilité d'en isoler complètement un être vivant.

Les plantes, de même que les animaux, ne peuvent exister qu'en échangeant, avec le milieu ambiant, de la matière et de l'énergie. Leur fonctionnement et la construction de leur substance en sont étroitement dépendants. La matière vivante fait partie intégrante du milieu dans lequel elle vit : on ne peut espérer faire l'étude d'un être indépendamment de ce milieu. Un organisme réel est tellement lié au milieu qu'il est impossible de l'en isoler autrement que par la pensée.

On peut considérer la vie comme une lutte de l'être vivant contre le milieu extérieur, ou comme un équilibre avec lui — plus exactement comme une succession d'états d'équilibre; dans tous les cas il faut tenir compte de la liaison indestructible entre l'organisme vivant et le milieu environnant. Or les conditions réalisées par le milieu ambiant sont extrêmement complexes, et l'étude approfondie d'une plante par rapport à ce milieu serait tellement compliquée qu'on peut considérer ce problème comme ne permettant pas de solution définitive. Si certains éléments chimiques participant à la constitution de l'être vivant sont bien connus et décelables par les méthodes habituelles d'analyse, d'autres n'existent qu'en proportions infimes. En outre ces éléments sont groupés sous forme de combinaisons plus ou moins instables et transformables, mélangées de telle façon que les propriétés que nous considérons habituellement peuvent être masquées. Certaines de ces combinaisons subissent des réactions qui nous sont connues, mais il en existe beaucoup d'autres que nous sommes obligés de deviner.

#### 2. Les facteurs du milieu.

La plante ne subsiste que par des échanges continuels avec le milieu. Mais ces échanges dépendent des conditions réalisées par le milieu (sol, eau, air, lumière...).

La plante, qui puise dans le sol les matières minérales nécessaires à son développement, subit nécessairement l'influence des variations de la composition de ce sol ainsi que de la quantité d'eau qu'il peut lui fournir. La moindre variation de la composition de l'atmosphère<sup>(1)</sup> qui baigne toutes les parties aériennes de la plante doit nécessairement modifier les échanges entre la plante et le milieu. La lumière, source d'énergie pour les synthèses effectuées par la plante, provoque également des modifications dans les échanges, par les variations de son intensité.

Les conditions où vivent les plantes sont si complexes qu'il est fréquemment impossible de savoir exactement quels sont les facteurs essentiels qui agissent sur la présence ou l'absence d'une espèce dans un habitat considéré. Les caractères que l'on indique d'ordinaire, en écologie végétale, pour définir le milieu où croît une plante sont les plus apparents : ce ne sont pas nécessairement ceux qui réellement influent le plus sur son développement. Ce ne sont pas les facteurs voisins de l'optimum pour la végétation qui ont le plus d'influence, mais ceux dont l'action est voisine de la limite inférieure ou de la limite supérieure compatible avec l'existence de la plante<sup>(2)</sup>; une faible variation de ces facteurs dans cette zone modifie la végétation. Une modification parfois minime d'un facteur suffit pour influencer considérablement sur la plante. Des conditions locales déterminées permettent d'expliquer l'abondance et même la prédominance de certaines espèces de plantes en des stations bien délimitées. Le milieu ambiant est non seulement complexe, mais il est aussi hétérogène dans le temps et dans l'espace; chaque facteur, en un point donné, peut varier d'un moment à l'autre (par exemple : humidité de l'air, intensité lumineuse); chaque facteur, à un instant donné, peut avoir une intensité différente d'un point à un autre (par exemple : teneur en eau du sol), même dans une station homogène à première vue.

Clements, seul ou avec différents collaborateurs, a tenté une étude analytique et synthétique poussée des différents facteurs, qui l'a conduit à les classer de la façon suivante : les facteurs directs, c'est-à-dire ceux qui agissent directement sur les végétaux : teneur en eau du sol, humidité atmosphérique, lumière, aération du sol, sels solubles du sol; les facteurs indirects agissent par l'intermédiaire des premiers; ce sont la température, les précipitations atmosphériques, le vent, la pression barométrique; les facteurs lointains sont ceux qui exercent une action sur les facteurs indirects : ainsi l'altitude, la pente, l'exposition.

Comme la plupart des classifications, celle-ci n'a rien d'absolu, et l'importance relative des facteurs, ainsi que leur mode d'action, diffèrent d'un milieu à un autre.

---

1. MOLLIARD, *Action de la composition de l'atmosphère sur le développement des plantes vertes* (Rev. Gén. Bot., 1938).

2. C'est ce que l'on désigne parfois sous le nom de « loi du minimum » de Lundegårdh.

### 3. Les variations produites par les facteurs du milieu.

Dans les limites entre lesquelles la variation d'un facteur est compatible avec l'existence de la plante, celle-ci réagit en modifiant sa morphologie; elle peut aussi, dans certains cas, réagir en modifiant plus ou moins le milieu.

Les changements dans le milieu entraînent des transformations dans les réactions dont la plante est le siège; celles-ci provoquent des variations de forme et de structure. Ces variations ont été appelées variations fluctuantes ou fluctuations, pour les distinguer des mutations, variations brusques et spontanées (ou du moins paraissant telles). La variabilité fluctuante est continue et résulte de l'action du milieu extérieur sur le corps ou soma des individus; elle est d'amplitude différente suivant les individus, et non héréditaire. Elle est à l'origine des « formes de croissance » différentes d'une même espèce; d'après la définition donnée par Plantefol, « ce terme désigne les formes diverses sous lesquelles une espèce peut croître et continuer à croître dans les divers milieux qui lui sont offerts... Ne pourront mériter d'être appelées formes de croissance que celles qui, rencontrées dans la nature ou produites expérimentalement, présenteront cet équilibre d'entretien qui s'exprime dans la stabilité de tous les caractères ».

La plante étudiée continue à vivre en modifiant sa forme; il se produit une recoordination des fonctions : la plante s'est « adaptée à son milieu ».

La variabilité discontinue consiste en variations brusques de la constitution germinale, variations qui sont immédiatement héréditaires.

### 4. Les méthodes d'étude de l'action des facteurs.

Je me suis proposé de rechercher quelques manifestations de fluctuations. De nombreux auteurs ont étudié notamment l'influence du climat sur la morphologie des plantes. Or le climat renferme une telle complexité de facteurs qu'il est indispensable de chercher à isoler, si possible, l'action de l'un de ces facteurs : c'est ce qu'ont déjà fait plusieurs expérimentateurs, étudiant les uns l'action de la lumière, les autres l'action de certains éléments du sol, d'autres l'action des constituants de l'atmosphère.

Les méthodes d'étude peuvent se réduire à deux types essentiels. On peut prendre un certain nombre d'individus d'une même espèce, aussi identiques que possible, ayant vécu dans les mêmes conditions, et les placer un temps plus ou moins long dans des conditions différentes. D'autre part on peut chercher à étudier des individus d'une même espèce ayant constamment vécu dans des conditions différentes pour chacun d'eux. Il semble évident que l'action morphogène des facteurs extérieurs est plus nettement mise en évidence par la deuxième méthode : ce serait la méthode de choix, si elle était toujours praticable. En fait elle ne peut

s'appliquer que pour des conditions ne s'écartant pas trop des conditions naturelles correspondant à l'optimum pour chacun des facteurs. La première méthode permet, au contraire, d'effectuer des expériences pouvant s'éloigner beaucoup des conditions optima.

##### 5. Peut-on tirer des conclusions valables des expériences physiologiques ?

a) Si on tente d'étudier un être vivant indépendamment du milieu, on n'étudie pas un corps naturel, mais une sorte d'abstraction, de fiction schématique. L'expérience, pour arriver à isoler l'influence de chacun des facteurs, doit se proposer de faire varier un seul d'entre eux à la fois, les autres restant les mêmes.

Au contraire, dans la nature, les actions des divers facteurs sont simultanées et leur intrication est complexe; ces actions peuvent se modifier mutuellement. Par exemple, la température de l'air influe sur la teneur en eau du sol; ces facteurs agissent tous deux sur la plante; la température a donc une action complexe, directe et indirecte.

« L'expérience physiologique est forcément schématique et, pour ainsi dire, anormale » (Plantefol). Mais comme il n'y a pas d'autre procédé d'étude, il faut bien s'en contenter, et en extraire tout ce qui est possible.

b) Une autre objection, qui a également sa valeur, contre l'expérience physiologique, est le fait que les individus ne sont pas identiques : une réaction déterminée de l'un d'eux ne prouve pas nécessairement que d'autres auraient la même réaction dans les mêmes conditions; si l'on expérimente sur une plante d'une espèce donnée, on risque de rencontrer une forme aberrante, s'écartant plus ou moins du type normal. Pour diminuer la probabilité de rencontrer un cas exceptionnel, la seule solution sera d'augmenter le nombre des exemplaires en expérience.

c) Si l'on considère d'autres sciences que les sciences biologiques, il est facile de se rendre compte que leurs progrès n'ont été possibles que grâce à l'expérience, même si cette expérience n'est pas conforme aux conditions que l'on rencontre couramment dans la nature. Ainsi la plupart des corps que la chimie a isolés et étudiés seraient encore inconnus si l'on avait attendu que les circonstances naturelles les isolent. Dans le même ordre d'idées les progrès auraient été à peu près nuls si on s'était abstenu d'étudier tel ou tel corps sous le prétexte qu'on ne savait pas l'obtenir à l'état rigoureusement pur; bien au contraire, ce sont des études faites sur des corps plus ou moins bien purifiés qui ont permis d'établir les lois qui s'appliquent aux corps purs, et aussi de trouver des moyens d'obtenir les corps à un plus grand degré de pureté.

---

## CHAPITRE II

### But de ce travail.

#### 1. Influence morphogène de l'action continue ou périodique d'un facteur du milieu.

Les lois auxquelles obéissent les réactions internes des plantes ne paraissent pas en contradiction avec les lois qui régissent les phénomènes chimiques ou photochimiques. Or ces phénomènes n'évoluent pas de la même façon selon que les facteurs qui les influencent agissent d'une manière continue ou périodique.

Prenons comme exemple les lois des actions photochimiques<sup>(1)</sup>; même dans le cas de la matière non vivante, le problème est si complexe qu'il est impossible de trouver des lois simples. En laissant de côté les difficultés rencontrées pour déterminer le coefficient d'absorption des radiations étudiées, pour doser les produits transformés, pour éliminer les produits de la réaction qui modifieraient le milieu étudié, on rencontre la complication due à l'influence d'un traitement lumineux antérieur. Si la lumière intervient dans tous les cas pour déclencher la réaction, il arrive que certaines réactions ainsi amorcées continuent toutes seules; d'autres, au contraire, exigent, pour continuer, l'absorption de radiations de même longueur d'onde mais d'intensité moindre, ou de radiations différentes. Dans le cas d'une lumière monochromatique on n'obtient pas les mêmes résultats en faisant agir d'abord une forte intensité puis une faible intensité, ou en les faisant agir dans l'ordre inverse. Même en faisant agir un faisceau d'intensité constante, pendant un temps donné, il ne revient pas au même de le faire agir d'une façon continue ou d'une façon discontinue; une quantité totale d'énergie fournie n'a pas le même effet suivant qu'elle est fournie en bloc ou par petites portions.

Les actions photochimiques s'exercent dans les plantes qui, sous l'action de la lumière, effectuent la décomposition de l'anhydride carbonique et réalisent des synthèses. Il est naturel de penser que pour les plantes l'influence des actions antérieures est considérable. Effectivement, Bonnier, entre autres, a mis en évidence l'action morphogène de la discontinuité ou de l'alternance de certains facteurs par des cultures expérimentales.

Pour l'action de la lumière<sup>(2)</sup>, il a prouvé que la continuité de l'éclairement est le facteur morphogène dont l'influence est dominante dans le climat arctique.

---

1. BOUASSE (H.), *Vision et reproduction des formes et des couleurs* (Paris, 1917).

2. BONNIER (G.), *Influence de la lumière électrique continue sur la forme et la structure des plantes* (Rev. Gén. Bot., VII, 1895). [Voir suite de la note à la page 55.]

Pour l'action de la température, Bonnier a montré par des cultures effectuées à basse température, à température moyenne et à des températures alternantes (moyennes pendant le jour, voisines de 0° pendant la nuit) que la température alternante produisait des résultats comparables à ceux du climat alpin<sup>(3)</sup>. Dans une de ses expériences, des pieds de *Teucrium Scorodonia* primitivement semblables étaient divisés en quatre lots :

Lot 1 : plantes constamment dans une étuve froide dont la température est maintenue entre 4° et 9°, et ne recevant que de la lumière diffuse ;

Lot 2 : plantes constamment en plein air (15° à 30°) ;

Lot 3 : plantes en plein air le jour, et dans l'étuve froide la nuit ;

Lot 4 : plantes constamment dans une étuve à température voisine de 15°, et ne recevant que de la lumière diffuse.

Comme résultats : les plantes 2 et 4 ont sensiblement les mêmes caractères : les différences d'éclairement et d'état hygrométrique qui résultent de la culture en étuve n'ont pas une grande importance ; les plantes du lot 3 diffèrent beaucoup des autres : elle sont bien plus petites, elles ont des entre-nœuds plus courts et une coloration très intense.

Plantefol<sup>(4)</sup>, dans la conclusion d'une étude approfondie sur l'*Hypnum triquetrum*, dit : « L'eau elle-même, par le rythme des alternances de sécheresse et d'humidité, la lumière aussi, par la variation de la radiation, sont au premier rang des facteurs morphogènes. »

Mais il peut arriver que diverses conditions soient tellement liées qu'il est extrêmement difficile, sinon impossible, de les séparer. Par exemple dans le cas des expériences de Bonnier sur les alternances de température, on peut se demander si la variation de température ne pourrait exercer aussi une action indirecte, et si les résultats trouvés ne seraient pas, au moins partiellement, dus à une action secondaire de la température par modification de l'humidité atmosphérique.

## 2. Les alternances de sécheresse et d'humidité.

Gausсен<sup>(5)</sup> a émis l'hypothèse que les effets du climat alpin pourraient être dus, pour une grande part, aux variations de l'humidité atmosphérique :

LUBIMENKO (V.-N.) et SZBGLOVA (O.-A.), *L'adaptation photopériodique des plantes* (Rev. Gén. Bot., XL, 1928).

ALLARD (H.-A.), *Length of day in relation to the natural and artificial distribution of plants* (Ecology, 1932).

3. BONNIER (G.), *Recherches expérimentales sur l'adaptation des plantes au climat alpin* (Ann. Sc. Nat. Bot., 7<sup>e</sup> série, XX, 1894).

4. PLANTEFOL (L.), *Etude biologique de l'Hypnum triquetrum. Relations entre la morphologie, la physiologie et l'écologie d'une espèce végétale* (Ann. Sc. nat., Bot., IX, 1927).

5. GAUSSEN (H.), *Végétation de la moitié orientale des Pyrénées. — Sol ; climat ; végétation* (Bull. Soc. hist. nat. Toulouse, LV, 1926).

« En montagne, le climat connaît souvent la saturation, mais aussi les sécheresses presque absolues. Les contrastes sont très grands et en même temps très brusques. Cette question des contrastes du climat alpin n'a pas été mise en relief d'une façon suffisante par les auteurs. Nous sommes amenés à lui attribuer une grande importance en biologie. Nous y voyons une des principales raisons de la présence d'adaptations xérophiiles chez les plantes de montagne, malgré un sol assez humide et une pluviosité abondante. Ces adaptations ne se comprendraient pas s'il n'y avait pas une transpiration particulièrement élevée entre les moments de pluie ou d'humidité. On pourrait essayer, au laboratoire, des expériences analogues à celles de Bonnier (1895). Il me paraît probable qu'on obtiendrait des modifications des tissus dans le sens xérophile en soumettant des plantes à des alternatives d'air sec et saturé. »

Notons que cet auteur ne parle pas de la durée d'action de l'air sec et de l'air saturé; les quelques données météorologiques qu'il possédait indiquaient que, dans un mois, l'air était souvent saturé et souvent presque sec, mais rien ne montrait s'il y avait de longues périodes sèches et de longues périodes de saturation.

Je me suis proposé de vérifier si l'hypothèse de Gausсен était exacte, et d'étudier l'influence morphogène des alternatives de sécheresse et d'humidité.

### 3. Le problème à résoudre.

Il me fallait, en laissant les autres conditions identiques, soumettre les plantes à ces variations brusques et plus ou moins fréquentes; pour étudier la question de très près, il était nécessaire d'effectuer ces variations avec des fréquences plus ou moins longues, de façon à voir si l'action produite était progressive et à partir de quelle fréquence elle devenait sensible. L'expérience faite directement aurait été presque impossible matériellement. Il aurait fallu une personne en permanence auprès des sujets en expérience.

J'ai donc été amené à chercher à réaliser automatiquement ces variations d'humidité. Je décris au chapitre VIII la solution que j'ai adoptée pour cet appareil.

### 4. De quelques divergences dans les formules classiques sur l'évaporation.

Les variations d'humidité doivent agir sur la plante en modifiant sa transpiration et par suite la concentration du suc cellulaire et l'absorption. Mais la transpiration de la plante ressemble par certains points au phénomène physique d'évaporation et suit une partie des lois qui le régissent. Or en examinant les formules classiques de l'évaporation on constate des divergences parfois assez nettes entre les auteurs.

J'ai donc été amené à reprendre l'étude de l'évaporation, afin de pouvoir choisir les résultats qui me semblaient le mieux en accord avec l'expérience. Par la même

occasion, il ne m'a pas semblé superflu de revoir rapidement les méthodes de mesure de l'humidité de l'air, en me plaçant avant tout au point de vue pratique de l'étude des relations entre la répartition des plantes et l'humidité atmosphérique.

Le sujet primitif de ce mémoire s'est donc trouvé augmenté, et j'ai cru utile de faire une étude générale du problème de la transpiration chez les plantes, dans ses rapports avec le phénomène physique d'évaporation.

##### **5. Plan de l'étude présentée dans ce travail.**

J'étudierai donc rapidement l'hygrométrie : elle fera l'objet du prochain chapitre.

Dans les chapitres IV et V, j'insisterai sur les lois de l'évaporation, tant au point de vue théorique qu'au point de vue des vérifications expérimentales les plus récentes, et sur leur relation avec la transpiration des plantes.

Comme j'envisagerai les résultats de mes expériences au point de vue des rapports avec les divers types de climat dans nos régions, je serai amené à rechercher les caractères hygrométriques de ces climats, particulièrement en montagne : cela fera l'objet des chapitres VI et VII.

Je passerai enfin à l'étude expérimentale de l'action des alternatives de sécheresse et d'humidité sur la structure des plantes ; j'essaierai de montrer l'influence de la période de ces variations. Je ferai aussi agir d'autres facteurs tels que le *pH* ou la lumière pour voir si l'influence de la période des variations est modifiée. Cette étude expérimentale comprendra les chapitres VIII à XI.

Enfin je m'efforcerai de tirer quelques conclusions de l'ensemble des différents résultats obtenus.

## DEUXIÈME PARTIE

### L'évaporation et la transpiration des plantes.

---

#### CHAPITRE III

##### Hygrométrie.

###### 1. Objet de ce chapitre.

Dans le chapitre précédent j'ai insisté sur la grande importance de la continuité ou de la discontinuité de l'action des facteurs en général, par exemple la lumière, la température. Il doit en être de même pour la question des alternances de sécheresse et d'humidité. Mais l'humidité ou la sécheresse de l'atmosphère sont des quantités mesurables : il était tout naturel d'examiner les moyens de les exprimer numériquement, ainsi que les méthodes de mesure. C'est ainsi que j'ai été amené à rédiger ce chapitre(\*).

J'ai repris les définitions et indiqué l'équivalence des modes d'évaluation. Ensuite j'ai donné des formules destinées à prévoir les heures de remplissage des éprouvettes de mon appareil (chap. VIII).

Ensuite je passe rapidement en revue les principaux dispositifs de mesure de l'humidité atmosphérique ou de l'évaporation et je fais leur comparaison. J'indique, pour terminer, différents modes d'expression des résultats.

Ce que j'apporte de nouveau dans ce chapitre est : une table pour le calcul du déficit de saturation (cette table me servira en particulier pour abréger certains calculs numériques au chap. VII), une formule simple donnant la tension maximum de la vapeur d'eau en fonction de la température entre 0° et 25°, et enfin un abaque permettant d'obtenir graphiquement le déficit de saturation.

---

1. Pour tout ce chapitre, cf. :

BOUSSE (H.), *Thermodynamique* ;

BONGARDS (H.), *Feuchtigkeitmessung* (Munich et Berlin, 1926) ;

HANN (J. von), *Lehrbuch der Meteorologie* (4<sup>e</sup> umgearb. Ausgabe, herausgeg. von R. Süring, 1926) ;

LINKE (F.), *Meteorologisches Taschenbuch*, chap. VII, par Kleinschmidt (E.), (Leipzig, 1931).

## A) Définitions.

**2. Teneur d'une atmosphère en vapeur d'eau.**

La quantité d'eau qui se trouve à l'état de vapeur dans l'unité de volume n'est limitée que par la température; si la limite est atteinte, l'espace considéré est saturé de vapeur d'eau.

On peut caractériser l'état d'une atmosphère plus ou moins humide par sa teneur absolue(\*) en vapeur d'eau,  $\epsilon$ , exprimée par exemple en grammes d'eau réellement contenus dans un mètre cube d'air; on peut aussi donner la pression effective  $p_1$  de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Mais la considération de cette teneur absolue n'indique pas immédiatement si l'atmosphère est plus ou moins saturée. Or, ce qui importe, pour l'étude des phénomènes où intervient l'évaporation, c'est de savoir si l'atmosphère est plus ou moins éloignée de son point de saturation.

**3. Etat hygrométrique.**

On a un renseignement meilleur au sujet de l'état de l'humidité de l'air, si on indique l'état hygrométrique. C'est le rapport de la tension actuelle  $p_1$  de la vapeur d'eau dans l'air, à la température  $t_1$ , à la tension maximum (tension correspondant à l'équilibre)  $p_s$  de la vapeur d'eau à la même température. On a donc, en représentant par  $k$  l'état hygrométrique,

$$k = \frac{p_1}{p_s}.$$

On peut l'évaluer en %.

Souvent on désigne sous le nom d'humidité relative(\*)  $f$  le produit par 100 de l'état hygrométrique  $f = 100 k$ . L'état hygrométrique s'exprime de 0 (air sec) à 1 (air saturé); l'humidité relative, de 0 (air sec) à 100 (air saturé). Les deux indications sont équivalentes; on emploie souvent les deux termes, état hygrométrique et humidité relative l'un pour l'autre: il n'y a d'ailleurs pas d'erreur possible.

La définition admet implicitement la loi de Dalton: la tension d'équilibre (tension maximum) de la vapeur au-dessus de son liquide à une température donnée est la même qu'il y ait ou non des gaz mélangés à cette vapeur. Cette loi n'est qu'approchée.

Si l'on dit que l'humidité relative est 60, cela veut dire que  $\frac{p_1}{p_s} = 0,60$ , mais aussi que l'air renferme 60 % de la masse maximum de vapeur qu'il pourrait contenir à la même température.

---

2. Humidité absolue (= absolute Feuchte des auteurs allemands).

3. Relative Feuchte.

#### 4. Déficit de saturation.

Il est beaucoup plus commode d'utiliser un autre mode d'évaluation. C'est le facteur d'évaporation ou déficit de saturation<sup>(4)</sup> ou encore déficit hygrométrique.

En effet les lois classiques de l'évaporation montrent que pour une surface évaporante donnée la vitesse d'évaporation est proportionnelle à la différence entre la tension de vapeur près de la surface et la tension de vapeur dans l'atmosphère. Lorsqu'un liquide se vaporise dans une atmosphère, la vitesse d'évaporation est donnée approximativement par la formule de Dalton<sup>(5)</sup> :

$$v = A \cdot \frac{s}{H} (p_s - p_i)$$

$p_s$  tension d'équilibre (tension maximum de la vapeur à la température de l'expérience);

$p_i$  tension actuelle de la vapeur;

H pression totale;

s étendue de la surface libre du liquide;

A coefficient dépendant entre autres de l'état d'agitation de l'atmosphère. Le brassage de l'atmosphère (illimitée ou non) amène au contact de la surface évaporante des portions non saturées; au contraire si l'atmosphère est calme, la vapeur formée au voisinage de la surface d'évaporation met à se diffuser un temps qui peut être très long.

Le facteur qui intervient dans les calculs d'évaporation est donc la différence entre la pression maximum de la vapeur d'eau à la température considérée et la pression actuelle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. C'est le facteur d'évaporation ou déficit de saturation

$$d = p_s - p_i.$$

Ce facteur d'évaporation, employé depuis longtemps en météorologie a été introduit en phytogéographie par Livingston et Shreve (1921).

#### 5. Relations entre ces diverses quantités.

On a par définition :

$$k = \frac{p_i}{p_s},$$

$$d = p_s - p_i.$$

4. Sättigungsdefizit, ou Dampfhunger des auteurs allemands, Vapor tension deficit des auteurs anglais.

5. Nous verrons plus loin qu'elle n'est pas exacte.

On en tire facilement :

$$1 - \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_2 - p_1}{p_2},$$

$$1 - k = \frac{d}{p_2};$$

ou encore :

$$d = (1 - k)p_2.$$

### 6. Masse de vapeur d'eau absorbable par un kilogramme d'air sec.

Il est facile de calculer la masse d'eau que pourra absorber 1 kg d'air, à la température  $t_2$  (en degrés centésimaux), à la pression  $H$  (en millimètres de mercure), pour arriver au degré hygrométrique  $k$ .

Soit  $p_2$  (en millimètres de mercure) la tension maximum de la vapeur d'eau à  $t_2$ .

Un kilogramme d'air sec pourra absorber pour arriver à la saturation  $m_2$  kilogrammes d'eau. La densité par rapport à l'air de la vapeur d'eau à basse température est sensiblement 0,622. On aura :

$$m_2 = 0,622 \frac{p_2}{H - p_2}.$$

Si l'air arrive au degré hygrométrique  $k = \frac{p_1}{p_2}$ , c'est que la vapeur d'eau y possède la pression partielle  $p_1 = kp_2$ .

La masse d'eau absorbable dans ce cas sera, pour 1 kg d'air sec :

$$m = 0,622 \frac{p_1}{H - p_1} = 0,622 \frac{kp_2}{H - kp_2}.$$

La masse totale du mélange (air + vapeur d'eau) sera, en kilogrammes,  $1 + m$ .  
Donc 1 kg du mélange final renferme :

$$\frac{m}{1 + m} \quad \text{kg de vapeur d'eau,}$$

et

$$1 - \frac{m}{1 + m} = \frac{1}{1 + m} \quad \text{kg d'air.}$$

Considérons le rapport  $\frac{m}{m_2}$ ,

$$\frac{m}{m_2} = \frac{0,622 \cdot \frac{kp_2}{H - kp_2}}{0,622 \cdot \frac{p_2}{H - p_2}} = \frac{k(H - p_2)}{H - kp_2} = \frac{H - p_2}{\frac{H}{k} - p_2}.$$

La valeur de ce rapport reste toujours comprise entre 0 et 1 (on laisse de côté le cas de la sursaturation qui correspond à un état instable). On a  $k \leq 1$ . La dérivée de  $\frac{m}{m_0}$  par rapport à  $p_0$  est :

$$\frac{H \left( 1 - \frac{1}{k} \right)}{\left( \frac{H}{k} - p_0 \right)^2}$$

elle est donc négative. Mais  $p_0$  augmente si la température augmente. Si la température  $t_0$  augmente,  $p_0$  augmente, par conséquent  $\frac{m}{m_0}$  diminue (H restant fixe).

Si la température  $t_0$  reste fixe,  $p_0$  est fixe; la dérivée de  $\frac{m}{m_0}$  par rapport à H est :

$$\frac{p_0 \left( \frac{1}{k} - 1 \right)}{\left( \frac{H}{k} - p_0 \right)^2};$$

elle est positive puisque  $k$  est inférieur à 1. Donc si H augmente,  $\frac{m}{m_0}$  augmente.

### 7. Masse d'eau absorbable par un kilogramme d'air humide.

Considérons 1 kg d'air sec; il absorbe d'abord  $m_0$  kg d'eau, correspondant à une tension de vapeur initiale  $p_0$  et à un état hygrométrique  $k_0 = \frac{p_0}{p_0}$ ,

$$m_0 = 0,622 \frac{k_0 p_0}{H - k_0 p_0}.$$

Il peut absorber une nouvelle quantité d'eau de façon à atteindre un degré hygrométrique final  $k$  correspondant à la tension de vapeur  $p_0$  (on suppose évidemment  $k_0 < k < 1$ ).

La masse d'eau finale correspondant à 1 kg d'air (mesuré sec) sera :

$$m = 0,622 \frac{k p_0}{H - k p_0}.$$

La masse à absorber  $m_1$  sera évidemment la différence entre la masse finale et la masse initiale

$$m_1 = m - m_0 = 0,622 \left[ \frac{k p_0}{H - k p_0} - \frac{k_0 p_0}{H - k_0 p_0} \right];$$

$$m_1 = 0,622 \frac{H p_0 (k - k_0)}{H^2 - H(k + k_0) p_0 + k_0 k p_0^2}.$$

Prenons la dérivée de  $m_1$  par rapport à  $H$

$$\frac{\partial m_1}{\partial H} = \frac{0,622 p_1 (k - k_0) (k_0 k p_2^2 - H^2)}{[H^2 - H(k + k_0)p_1 + k_0 k p_2^2]^2},$$

mais  $p_1 < H$ ,  $p_2^2 < H^2$ , et, à *fortiori*, puisque  $k_0$  et  $k$  sont inférieurs à 1,

$$k_0 k p_2^2 < H^2;$$

le terme  $k - k_0$  est positif.

La dérivée est donc négative;  $m_1$  est une fonction décroissante de  $H$ . Si  $H$  diminue, la quantité de vapeur d'eau absorbable augmente.

Considérons maintenant la dérivée de  $m_1$  par rapport à  $p_1$

$$\frac{\partial m_1}{\partial p_1} = \frac{0,622 H (k - k_0) (H^2 - k_0 k p_2^2)}{[H^2 - H(k_0 + k)p_1 + k_0 k p_2^2]^2}.$$

Puisque  $k - k_0 > 0$ , cette dérivée est du signe de  $H^2 - k_0 k p_2^2$ , donc elle est toujours positive puisque nous avons montré que

$$k_0 k p_2^2 < H^2.$$

Si  $p_1$  augmente,  $m_1$  augmente. En définitive, si la température augmente la quantité absorbable augmente.

Nous pouvons aussi considérer le rapport

$$\frac{m_1}{m_0} = \frac{0,622 H (k - k_0) p_1}{(H - k p_1) (H - k_0 p_1)} \times \frac{H - k_0 p_1}{0,622 k_0 p_1},$$

$$\frac{m_1}{m_0} = \frac{H (k - k_0)}{k_0 (H - k p_1)}.$$

Si on fixe  $k_0$ ,  $k$  et  $H$ , et si la température augmente,  $p_1$  augmenté; le dénominateur diminue, donc  $\frac{m_1}{m_0}$  augmente.

Si on fixe  $k_0$ ,  $k$ , et  $p_1$  (c'est-à-dire la température), on voit que si  $H$  augmente  $\frac{m_1}{m_0}$  diminue.

Les formules précédentes (§§ 6 et 7) m'ont servi à évaluer la consommation d'eau de mon appareil (chap. VIII); connaissant le débit et la durée totale de marche du ventilateur il était facile de prévoir le nombre de remplissages nécessaires des éprouvettes humidifiantes; la formule du § 6 donnait la limite maximum de la consommation d'eau.

B) **Mesures.****1. Classification des appareils de mesure.**

Les appareils utilisés servent à déterminer, soit la teneur absolue, soit l'état hygrométrique. On peut les ranger en plusieurs groupes suivant les principes sur lesquels ils reposent : hygromètres chimiques, hygromètres à saturation, hygromètres à absorption, hygromètres à condensation, psychromètres.

**2. Hygromètres chimiques.**

Les hygromètres chimiques ou hygromètres à poids comportent en principe un aspirateur qui fait passer un volume d'air déterminé dans des tubes garnis de matières absorbant la vapeur d'eau (chlorure de calcium, ponce sulfurique, anhydride phosphorique). La pesée de ces tubes desséchants, avant et après le passage de l'air, permet de déterminer la masse d'eau contenue dans un volume d'air donné.

Connaissant la température de l'air, on en tire facilement l'état hygrométrique et le déficit de saturation.

Mais ces hygromètres chimiques sont des appareils de laboratoire. La variation de masse des tubes desséchants lorsqu'on effectue la mesure, est de l'ordre du centigramme; cette méthode exige un temps assez long.

**3. Hygromètres à saturation.**

On enferme un certain volume de l'air à étudier, à la pression de l'atmosphère, dans une sorte de gros thermomètre à air à pression constante. On le maintient à la température de l'atmosphère; on le sature de vapeur d'eau par injection de fines gouttelettes, et on mesure l'accroissement de volume à pression constante.

Soient :  $H$  la pression atmosphérique (pression totale),

$k$  l'état hygrométrique,

$p_i$  la pression actuelle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère,

$p_s$  la pression de la vapeur saturée à la température de l'expérience; on a :

$$p_i = k p_s.$$

La tension partielle de l'air est dans l'atmosphère :

$$H - p_i = H - k p_s.$$

Après saturation à volume constant la pression du mélange sera

$$H - k p_s + p_s = H + (1 - k) p_s.$$

La température étant constante, on peut utiliser la loi de Mariotte.

Le volume initial de l'air enfermé étant  $V_i$ , le volume final de l'air enfermé étant  $V_s$ , sous la pression finale  $H$ , on a

$$[H + (1 - k) p_s] V_i = H V_s;$$

d'où

$$k = \frac{H}{p_s} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1} + 1 = \frac{(H + p_s)V_1 - H V_2}{p_s V_1}$$

Cette méthode est très délicate, surtout à cause de la difficulté de maintenir la température constante.

**4. Hygromètres à absorption.**

Ce sont les hygromètres à cheveu et les hygromètres à boyau.

Un cheveu s'allonge dans l'air humide; sa longueur dépend de la température et de l'état hygrométrique. Il semble que la fonction qui relie la longueur du cheveu à la température et à l'état hygrométrique soit mal déterminée : les variations de ces facteurs ont aussi une influence. On lit sur une graduation l'allongement amplifié. Gay-Lussac a donné des tables, valables en gros pour tous les cheveux, donnant la variation relative de longueur en fonction de l'état hygrométrique (\*).

Les cheveux trop tendus ne suivent plus les lois de Gay-Lussac; il faut éviter de tirer sur le cheveu lors du montage ou du réglage de l'appareil.

L'hygromètre à cheveu ne réagit pas immédiatement à une variation de l'état hygrométrique : il présente une certaine paresse, qui augmente si on réunit plusieurs cheveux en un seul faisceau.

L'action de la température est assez difficile à définir. Il faudrait une graduation particulière pour chaque température. Il y a une sorte de dilatation, comme pour la plupart des corps. Une élévation de température produit le même effet qu'une augmentation d'humidité(?).

6. On a donné d'autres tableaux d'étalonnage des hygromètres à cheveu. Par exemple on a d'après Kleinschmidt :

Humidité relative % :	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Position de l'aiguille en degrés équidistants. . .	100	95,4	90,5	85,2	79,2	72,8	63,7	52,8	38,8	20,9	0

7. Soit  $\Delta f$  la variation apparente d'humidité relative produite par une variation  $\Delta t$  de température. On peut écrire  $\Delta f = \gamma \cdot \Delta t$ . Le coefficient  $\gamma$  n'est pas une constante; il est donné par le tableau suivant (cf. Linke).

Humidité relative % = $f$ .	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$\gamma$	0,136	0,130	0,120	0,108	0,094	0,080	0,063	0,050	0,038	0,032	0,027

A part cela, ce sont des appareils très pratiques; il en existe de nombreux modèles portatifs. Ils ont l'inconvénient de nécessiter de fréquents étalonnages(\*) si on veut obtenir une certaine précision.

### 5. Hygromètres à condensation.

Les hygromètres du type de l'hygromètre d'Alluard permettent des mesures assez précises : leur principe repose sur la détermination du point de rosée.

Un corps (généralement une paroi métallique), placé dans une atmosphère non saturée d'humidité, est refroidi progressivement. Il arrive un moment où l'air qui est en contact avec ce corps atteint la température  $t_1$  pour laquelle la vapeur d'eau qu'il contient devient saturante, d'où dépôt de buée sur la surface refroidie. La température  $t_1$  du corps refroidi est lue sur un thermomètre. On note à l'aide d'un autre thermomètre la température extérieure  $t_2$ .

Les tables de constantes physiques donnent  $p_1$  tension maximum de la vapeur d'eau correspondant à  $t_1$ , et  $p_2$  tension maximum correspondant à  $t_2$ . On peut donc calculer facilement  $k$  ou  $d$ .

Une plaque métallique non refroidie, placée à côté de la plaque refroidie permet d'apprécier plus facilement l'apparition du dépôt de buée. Le refroidissement est généralement obtenu par l'évaporation d'éther dans lequel on fait barboter de l'air; un thermomètre plongé dans cet éther donne la température  $t_1$  (on admet que la face extérieure du récipient est à la température de l'éther). On observe l'apparition du dépôt de buée et on lit le thermomètre avec une lunette pour éviter de s'approcher de l'appareil. La buée apparaît à la température  $t_1'$ ; en laissant réchauffer la boîte, la buée disparaît à la température  $t_1''$  : on prend  $t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}$ ; d'ailleurs  $t_1'$  et  $t_1''$  ne diffèrent que d'une fraction de degré si l'expérience est bien faite.

Théoriquement la méthode est critiquable : la température de l'air varie, au voisinage de la plaque métallique, depuis  $t_1$  à la surface jusqu'à  $t_2$  à une certaine distance. La formation de buée ne correspond donc pas rigoureusement à la saturation. Cependant les résultats concordent bien avec ceux que donnent les hygromètres chimiques.

### 6. Psychromètres.

Les psychromètres utilisent l'abaissement de température produit par l'évaporation de l'eau.

On compare les indications données par deux thermomètres. Le réservoir de l'un est sec; celui de l'autre est maintenu humide. Le réservoir de ce dernier est par exemple recouvert d'une mousseline mouillée.

---

8. Pour les réglages et l'étalonnage voir LINKE, *Meteorologisches Taschenbuch*, Leipzig, 1931.

Soient :  $t_2$  la température indiquée par le thermomètre sec,  $t_1$  la température indiquée par le thermomètre mouillé,  $t_1 < t_2$ ,

$s$  la surface de la mousseline;

$H$  la pression atmosphérique;

$p_1$  la tension de la vapeur saturée à la température  $t_1$ .

On suppose que l'évaporation se produit, à la surface de la mousseline, suivant la formule de Dalton

$$v = A \cdot \frac{s}{H} (p_2 - p_1).$$

Dans l'unité de temps, la quantité de chaleur soustraite au thermomètre mouillé est :

$$Q = \frac{A s}{H} (p_2 - p_1) \cdot L;$$

$L$ , chaleur de vaporisation de l'eau, que nous considérerons comme constante.

Lorsque l'équilibre thermique est établi, dans l'unité de temps la surface  $s$  reçoit des corps environnants supposés à la température  $t_2$ , une quantité de chaleur égale à  $Q$ .

La loi de réchauffement de Newton nous donne :

$$Q = B \cdot s (t_2 - t_1),$$

d'où en égalant

$$\frac{A s}{H} (p_2 - p_1) L = B s (t_2 - t_1),$$

$$p_2 - p_1 = \frac{B \cdot H}{A \cdot L} (t_2 - t_1) = C \cdot H (t_2 - t_1);$$

(par exemple, d'après Sprung, si  $H$ ,  $p_1$  et  $p_2$  sont exprimés en millimètres de mercure, on a  $C = \frac{1}{1510} = 0,00066$ ).

$A$ ,  $B$ ,  $C$  sont des constantes par hypothèse : cela ne peut être admis que dans des conditions bien déterminées. En effet, si un thermomètre est immobile (et surtout s'il est exposé au soleil), ses indications sont en général sans rapport avec la température réelle de l'air. Pour qu'il donne la température de l'air, il faut augmenter la masse d'air qui vient au contact du réservoir thermométrique dans un temps donné; par exemple on peut utiliser le thermomètre-fronde. On fait tourner rapidement le thermomètre suspendu par une ficelle; s'il parcourt un chemin de l'ordre de 3 à 10 mètres par seconde, la température qu'il indique ne dépend plus de la vitesse, ni du fait que l'on opère à l'ombre ou au soleil : c'est donc bien la température de l'air que l'on détermine. On peut aussi placer le thermomètre dans un tube où des ailettes mues par un fort ressort font passer un courant d'air rapide.

Naturellement les mêmes remarques s'appliquent aussi au thermomètre mouillé : la masse d'air qui touche son réservoir en une seconde doit être considérable; il faut l'utiliser en fronde ou avec un ventilateur assez puissant.

Par exemple l'hygromètre d'Assmann employé industriellement comporte un ventilateur mù par un ressort et aspirant un courant d'air par un tube central. Ce courant est dirigé également sur les deux réservoirs des thermomètres. La mousseline du thermomètre mouillé est constamment imbibée d'eau par capillarité.

Même avec toutes ces précautions la « constante » C n'est pas absolument bien déterminée (suivant les auteurs, elle varie entre 0,00065 et 0,00079). *A fortiori* les indications recueillies dans les observations courantes avec des thermomètres voisins et immobiles n'ont à peu près aucune valeur; il en est de même pour les courbes données par certains appareils enregistreurs basés sur ce principe.

### 7. Évaporimètres<sup>(9)</sup>.

On peut également essayer une mesure directe de l'évaporation en déterminant la perte en un temps déterminé d'une surface d'eau connue; on a ainsi une résultante des effets de l'humidité de l'air, de la température, de l'insolation et du vent.

La nature du revêtement du sol et sa couverture végétale (plage, prairie, forêt...) interviennent.

Les évaporimètres, avec toutes sortes de précautions, permettent d'obtenir au plus une évaluation de la « force d'évaporation » (*Verdunstungskraft*); avec deux appareils de construction différente, on ne trouve pas les mêmes résultats pour cette force d'évaporation; tout au plus l'allure de leur marche journalière et annuelle est semblable dans les grandes lignes.

On a utilisé des balances d'évaporation : un plateau contient de l'eau; on note sa variation de masse. On a construit sur ce principe des appareils enregistreurs.

Dans d'autres cas on a utilisé un plateau supportant une couche de terre garnie de plantes<sup>(10)</sup>.

D'autres appareils utilisent l'évaporation de l'eau à la surface d'une paroi poreuse. Citons le tube de Piche (employé par Walter en écologie végétale en 1928), et les corps évaporants de Livingston<sup>(11)</sup> : ce sont des sortes de petits ballons en porcelaine poreuse, de 3 à 4 centimètres de diamètre, remplis d'eau distillée qui est remplacée, à mesure qu'elle s'évapore, par de l'eau d'un récipient gradué (atmomètres).

Dans tous les cas, les résultats ne sont utilisables que si on se sert toujours d'appareils identiques et semblablement disposés.

9. On trouve indifféremment : évaporomètres ou évaporimètres, suivant les auteurs.

10. MAYR, *Wasserkraft und Naturwissenschaft*, 1928.

11. LIVINGSTON (B.-E.), *Atmometry and the porous cup Atmometer I* (The Plant World, 1915).

### 8. Comparaison sommaire<sup>(12)</sup>.

Chacun des appareils précédents a ses avantages et ses inconvénients.

Les hygromètres chimiques peuvent donner une très grande précision. Ils sont fragiles et encombrants, donc non transportables.

Les hygromètres à absorption, à condition d'être fréquemment vérifiés par comparaison avec un hygromètre à condensation, donnent des indications approximatives. Ils peuvent fonctionner à des températures inférieures à 0°. On peut leur reprocher une certaine paresse : il leur faut assez de temps pour atteindre leur position d'équilibre. Leur principe est appliqué dans de nombreux appareils enregistreurs.

Les hygromètres à condensation seraient suffisamment précis, mais pas très pratiques en cas de déplacements fréquents.

Les psychromètres permettent des mesures assez précises à condition que la température ne soit pas inférieure à 0°. On les étalonne au laboratoire à l'aide d'un hygromètre à condensation. En les utilisant avec un ventilateur produisant un fort courant d'air, on élimine l'influence des mouvements de l'air et du rayonnement solaire. Une lecture se fait en deux ou trois minutes. Ils ont été employés notamment par Hagène<sup>(13)</sup>.

Les évaporimètres ont l'inconvénient de donner une résultante de nombreux facteurs (humidité de l'air, insolation, vitesse du vent...); finalement on ne sait pas au juste ce qu'on a mesuré. D'autre part leurs indications ne donnent que des valeurs moyennes correspondant à un temps assez long. Enfin deux appareils différents ne donnent pas de résultats comparables.

De tous ces dispositifs celui qui semble préférable pour des mesures rapides ne demandant pas une très grande précision, par exemple en géographie botanique, c'est l'hygromètre à absorption, étant entendu que l'appareil est assez fréquemment contrôlé par comparaison avec un hygromètre à condensation. Il suffit alors de relever l'état hygrométrique donné directement par l'appareil et la température extérieure. L'ensemble est donc très facilement transportable et permet des observations rapides. Il est indispensable, outre l'état hygrométrique, de noter la température, puisque, au point de vue botanique, ce qui intéresse c'est surtout le facteur d'évaporation  $d$ , et que ce déficit de saturation pour un état hygrométrique constant dépend de la température<sup>(14)</sup>.

12. Cf. HAGÈNE (Ph.), *Recherches écologiques sur quelques groupements végétaux des environs de Dijon* (Rev. Gén. Bot., XLIII, 1931).

13. HAGÈNE (Ph.), *loc. cit.*

14. C'est ainsi que J. Braun-Blanquet (1928) a pu expliquer la végétation de type désertique de la région littorale du Maroc, qui présente cependant une humidité relative élevée.

### C) Expression des résultats.

#### 1. Emploi des tables usuelles de tension de la vapeur d'eau.

Les tables qui figurent dans tous les recueils de constantes physiques donnent  $p_s$  connaissant la température  $t_s$ .

En utilisant un hygromètre dont la graduation donne  $k$  et en se servant des tables, on peut calculer  $d$  par la formule

$$d = (1 - k)p_s.$$

#### 2. Emploi de tables donnant le déficit de saturation.

On peut aussi dresser un tableau donnant directement  $d$  connaissant  $k$  et  $t_s$ . (Voir Annexe.) J'ai établi ce tableau pour les valeurs courantes ;

$t_s$  est donné de degré en degré ;

$k$  est donné de 0,05 en 0,05.

Les valeurs de  $t_s$  sont données par la première colonne : les valeurs de  $k$  sont portées sur la première ligne de ce tableau. On l'utilise comme tous les tableaux à double entrée.

Une interpolation facile permet d'obtenir les valeurs intermédiaires avec une approximation suffisante.

#### 3. Emploi de formules empiriques.

On peut également utiliser les formules suivantes qui peuvent rendre service quand on n'a pas de tables sous la main.

Pour les températures comprises entre 0° et 25° la valeur de la pression maximum de la vapeur d'eau est donnée avec une précision suffisante par la formule :

$$p = 0,0017 t^2 + 0,03 t + 0,46,$$

$p$ , pression maximum de la vapeur d'eau en centimètres de mercure ;

$t$ , température en degrés centésimaux.

Si l'on veut exprimer  $p$  en millimètres de mercure, la formule devient

$$p = 0,017 t^2 + 0,3 t + 4,6.$$

L'erreur relative commise en utilisant la valeur ainsi calculée au lieu de la valeur exacte ne dépasse pas 3 % dans le cas le plus défavorable c'est-à-dire pour la température de 25°. Au-dessus de cette température les écarts sont plus grands (l'erreur relative atteindrait 8 % pour 30°).

La formule est utilisable, pour les températures inférieures à 25°, avec une très bonne concordance<sup>(15)</sup>.

On pourrait évidemment avoir des formules donnant un accord meilleur avec les résultats expérimentaux, mais il faudrait faire intervenir des coefficients ou des exposants plus compliqués. (Parmi les nombreuses formules existantes, je citerai simplement celle de Magnus :

$$p = 4,579 \times 10^{\frac{7,4475 t}{234,67+t}},$$

qui est de nature exponentielle).

La formule que je propose présente l'avantage de la simplicité des calculs.

On peut donc écrire, en posant :

$$a = 0,017,$$

$$b = 0,3,$$

$$c = 4,6;$$

$$k = \frac{p_1}{p_2} = \frac{at_1^2 + bt_1 + c}{at_2^2 + bt_2 + c}.$$

Cette formule pourra servir si l'on a déterminé  $t_1$  et  $t_2$ , par exemple avec un hygromètre à condensation.

15. Formule donnant la tension maximum de la vapeur d'eau entre 0 et 25°

$$p = at^2 + bt + c,$$

$p$  en millimètres de mercure;  $t$  en degrés centésimaux.

$$a = 0,017; \quad b = 0,3; \quad c = 4,6.$$

$t$	$p$ calculé par la formule	$p$ mesuré (d'après Regnault)	Erreur relative pour 100
0	4,6	4,6	0
5	6,5	6,5	0
10	9,3	9,2	+1,1
15	12,9	12,7	+1,5
20	17,4	17,4	0
25	22,7	23,5	-3,4

Pour établir cette formule j'ai tenu compte du fait que la température moyenne en France était de 3° en hiver et 18° en été.

De même on aura :

$$\begin{aligned} d &= p_2 - p_1 = a(t_2^2 - t_1^2) + b(t_2 - t_1) \\ &= [a(t_1 + t_2) + b] (t_2 - t_1). \end{aligned}$$

Enfin si l'on a mesuré directement  $k$  et  $t_2$  :

$$d = (1 - k) (a t_2^2 + b t_2 + c).$$

#### 4. Emploi d'un abaque.

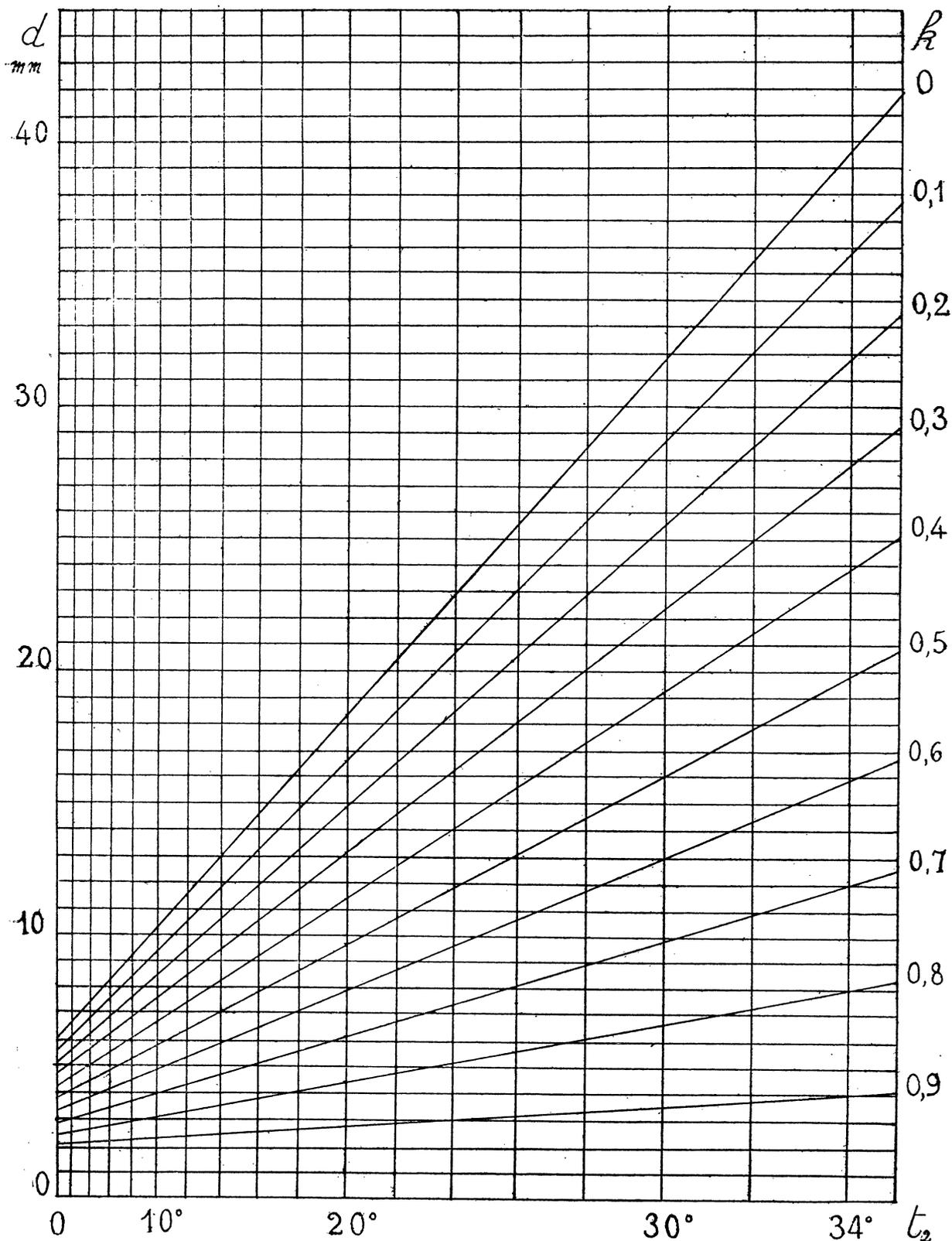
Enfin on peut obtenir  $d$  graphiquement connaissant  $k$  et  $t_2$  à l'aide de l'abaque que je publie ici (*fig. 1*). Exemple : soit à déterminer  $d$  pour une température  $t_2 = 25^\circ$ , l'état hygrométrique étant 0,6. Par le point de l'axe des températures marqué 25 on mène une verticale qui coupe la droite marquée  $k = 0,6$  en un point M. Par M on mène une horizontale qui donne immédiatement sur l'échelle de gauche  $d = 9^{\text{mm}},4$ .

Le tableau (voir Annexe) nous donne dans ce cas  $d = 9^{\text{mm}},42$ .

#### 5. Conclusion de ce chapitre.

J'ai étudié ce que je m'étais proposé au début de ce chapitre. J'ai établi une formule assez simple donnant la tension maximum de la vapeur d'eau en fonction de la température, entre 0 et  $25^\circ$ , ainsi qu'une table et un abaque permettant de trouver rapidement la valeur du déficit de saturation connaissant l'état hygrométrique et la température.

Nous pouvons aborder maintenant l'étude de l'évaporation.



I. — ABAQUE POUR LE CALCUL DU DÉFICIT DE SATURATION.

En abscisses, les températures  $t_2$  en degrés centésimaux; en ordonnées le déficit de saturation  $d$  en millimètres de mercure; sur les obliques, l'état hygrométrique  $k$ . Les parallèles à l'axe des ordonnées sont tracées de 2 en 2 degrés; les parallèles à l'axe des abscisses sont tracées de mm. en mm. de mercure; les obliques sont tracées de 0,1 en 0,1.

L'échelle du bas correspond à  $t_2$ .  
 L'échelle de droite correspond à  $k$ .  
 L'échelle de gauche donne  $d$ .

## CHAPITRE IV

### Étude de l'évaporation.

---

#### 1. Objet de ce chapitre.

Avant d'étudier la transpiration des plantes, il est indispensable d'étudier l'évaporation dont elle se rapproche par certains côtés. Ce chapitre contient une étude théorique générale.

Je commence par un exposé simple, calqué sur celui de Stefan et de Szymkiewicz; je m'attache surtout à bien préciser les hypothèses faites et à donner différentes expressions des formules obtenues.

Je passe ensuite à une généralisation de cette étude simple, établissant l'équation de continuité d'une façon un peu différente de la méthode classique.

Enfin j'expose une troisième méthode, déjà indiquée par de nombreux auteurs, mais qui n'a pas été systématiquement utilisée; je calque mes raisonnements sur ceux de la théorie de la conduction thermique. Cette méthode a l'avantage de donner directement pour l'évaporation d'une petite surface plane, dans une atmosphère illimitée, une valeur proportionnelle à la puissance 0,75 de l'aire de la surface: cette valeur est en bien meilleur accord avec les résultats expérimentaux que celle de Stefan qui trouvait l'évaporation proportionnelle à l'aire de la surface.

Je passerai ensuite à quelques influences modifiant l'évaporation (pesanteur, capillarité, substances dissoutes, agitation de l'air) qui interviendront pour la transpiration des plantes. J'énoncerai aussi quelques propositions relatives à l'influence de plusieurs surfaces évaporantes voisines, propositions qui trouveront également leur application dans l'étude de la transpiration des plantes.

#### 2. Historique.

Étant donné un liquide possédant une surface libre en contact avec une atmosphère, si cette atmosphère n'est pas saturée de la vapeur du liquide, une partie de celui-ci s'évapore. La rapidité avec laquelle s'effectue cette évaporation dépend de la forme et de l'aire de la surface évaporante, de la concentration de la vapeur dans l'atmosphère, et de l'état d'agitation de cette atmosphère.

L'étude théorique<sup>(1)</sup> en a été faite par de nombreux auteurs : citons Stefan, puis Jeffreys, pour certains cas particuliers ; elle a été reprise par Schierbeck au point de vue des relations physiologiques, et plus récemment par Walter, ainsi que par Szymkiewicz.

### A) Étude théorique simple.

#### 3. Formules relatives à la diffusion des gaz et des vapeurs.

L'intensité de l'évaporation dépend évidemment de la vitesse de diffusion de la vapeur dans l'atmosphère.

On doit à Stefan<sup>(2)</sup> les grandes lignes de l'étude de la diffusion des gaz en général. Lorsque deux gaz enfermés dans un même vase ne forment pas un mélange homogène, l'homogénéité tend à s'établir : ce phénomène constitue la diffusion. Le problème consiste à trouver suivant quelles lois l'homogénéité se produit.

Reprenons le mode de raisonnement de Stefan (c'est d'ailleurs cette marche qui a été suivie par Szymkiewicz pour arriver à une autre forme d'une des équations de Stefan).

On suppose un cylindre très long, de 1 cm.<sup>2</sup> de section ; on prend l'axe du cylindre comme axe des  $x$  ; on a fixé une origine sur cet axe. Deux gaz se propagent par diffusion en sens inverse dans ce cylindre.

On ne tient pas compte de l'influence de la pesanteur sur la rapidité de la diffusion. On suppose l'équilibre apparent établi : la composition du mélange est uniforme dans toute section droite du cylindre ; la pression  $H$  et la température  $\theta$  sont constantes tout le long du cylindre.

Soit  $p_1$  la pression partielle du premier gaz dans le mélange, dans une section droite ;  $p_2$  la pression partielle du second gaz dans la même section droite ;  $p_1$  et  $p_2$  dépendent de la position de la section droite considérée (définie par  $x$ ) et du temps  $t$  :

$p_1$  et  $p_2$  sont des fonctions de  $x$  et de  $t$  assujetties à la condition

$$(1) \quad p_1 + p_2 = H = \text{constante.}$$

1. STEFAN (J.), *Versuche über die Verdampfung* (Sitzungsber. d. K. Akad. Wien, 1874).

STEFAN (J.), *Ueber die Verdampfung aus einem kreisförmig oder elliptisch begrenzten Becken* (Sitzungsber. d. K. Akad. Wien, 1881).

JEFFREYS (H.), *Some problems of evaporation* (Phil. Mag., 1918).

SCHIERBECK, *Sur la vitesse de l'évaporation au point de vue spécial des relations physiologiques* (Bull. Acad. Sc. Danemark, 1896).

WALTER (H.), *Die Verdunstung von Wasser in bewegter Luft und ihre Abhängigkeit von der Grösse der Oberfläche* (Zeitschr. f. Bot., 1926).

SZYMKIEWICZ (D.), *Études climatologiques V* (Acta Soc. Bot. Pol., 1924-1925).

2. STEFAN (J.), *Ueber das Gleichgewicht und die Bewegung, insbesondere die Diffusion von Gasmengen* (Sitzungsber. d. K. Akad. Wien, 1871).

On suppose que les molécules du premier gaz situées à un instant donné dans une certaine section droite du cylindre se meuvent dans le même sens (sens des  $x$  croissants) avec la même vitesse  $u_1$ ; de même les molécules du second gaz situées au même instant dans la même section se meuvent en sens inverse des premières avec la vitesse  $u_2$  (si nous considérons  $u_1$  comme positive,  $u_2$  sera négative). Le nombre de molécules des deux gaz qui passent en une seconde à travers une section droite quelconque est le même, puisque la pression est constante tout le long du cylindre.

On peut évaluer l'intensité de la diffusion par la masse de chaque gaz qui traverse en une seconde la section considérée; cette masse est différente pour les deux gaz.

Soit  $\delta_1$  la densité (masse spécifique) du premier gaz en ce point à l'instant considéré; la vitesse de ce gaz étant  $u_1$ , la masse qui passe en une seconde est

$$(2) \quad M_1 = \delta_1 u_1.$$

On aurait de même pour le deuxième gaz

$$M_2 = \delta_2 u_2.$$

On peut remarquer que  $u_1$  est très petite, car la rapidité de la diffusion est extrêmement faible. On peut aussi évaluer l'intensité de la diffusion par le volume  $v_1$  qui serait occupé dans les conditions normales ( $0^\circ$ ;  $760^{\text{mm}}$ ) par les molécules du premier gaz ayant traversé en une seconde la section droite considérée.

Si  $d_1$  est la densité normale du premier gaz, on a :

$$(3) \quad v_1 = \frac{M_1}{d_1} = \frac{\delta_1 u_1}{d_1};$$

pour le deuxième gaz on aurait de même

$$v_2 = \frac{\delta_2 u_2}{d_2}.$$

Ce volume est le même en valeur absolue pour les deux gaz, d'après l'hypothèse d'Avogadro-Ampère;  $\frac{\delta u}{d}$  est proportionnel au nombre de molécules: or le nombre de molécules des deux gaz qui traversent dans le même temps une section droite est le même;

$u_1$  étant positif,  $u_2$  étant négatif, on aura algébriquement

$$(4) \quad \begin{aligned} v_1 + v_2 &= 0, \\ \frac{\delta_1 u_1}{d_1} + \frac{\delta_2 u_2}{d_2} &= 0. \end{aligned}$$

Si on considère les gaz comme parfaits :

$$(5) \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = d_1 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p_1}{H_0}, \\ \delta_2 = d_2 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p_2}{H_0}. \end{array} \right.$$

$H_0$  représente la pression normale de 760<sup>mm</sup> de mercure,  $T$  la température absolue;  $\theta$  étant la température centésimale,

$$T = \theta + 273.$$

$$T_0 = 273.$$

Combinant les équations (4) et (5)

$$(6) \quad p_1 u_1 + p_2 u_2 = 0.$$

Cette équation exprime que la pression reste constante dans le temps (loi de Dalton).

On peut considérer que le mouvement de l'un des gaz à travers l'autre est produit par la différence de tension des gaz : cette tension diminue constamment dans le sens positif pour le premier gaz, dans le sens négatif pour le deuxième. Si on envisage deux sections droites distantes de  $dx$ , la diminution de pression partielle du premier gaz entre ces deux sections étant  $dp_1$ , l'unité de masse du premier gaz qui passe d'une section à l'autre se meut sous l'action d'une force  $-dp_1$ . Cette masse de gaz éprouve d'autre part une résistance due à l'existence du second gaz : on admet que cette résistance est proportionnelle à la masse spécifique du deuxième gaz et à la vitesse relative du premier par rapport au deuxième. On écrit que la force motrice est équilibrée par la résistance, puisque la vitesse de propagation du premier gaz à travers le deuxième est sensiblement uniforme et d'ailleurs très faible :

$$-dp_1 = A(u_1 - u_2) \cdot \delta_1 \delta_2 \cdot dx,$$

$u_1 - u_2$  vitesse relative des deux gaz;

$A$  constante caractéristique pour les deux gaz considérés;

$\delta_1, \delta_2$  densités actuelles des deux gaz.

On peut écrire cette équation en tenant compte du fait que les pressions partielles dépendent de  $x$  et du temps  $t$ . On considère ici  $t$  comme constant; on a donc une différentielle partielle par rapport à  $x$  :

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial x} = A \delta_1 \delta_2 (u_2 - u_1); \\ \text{et de même} \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = A \delta_1 \delta_2 (u_1 - u_2). \end{array} \right.$$

En somme on a fait l'hypothèse que dans chaque gaz la force motrice est proportionnelle au taux de variation de la pression partielle, et que la résistance au mouvement est proportionnelle à la vitesse relative et au produit des densités actuelles ; on a écrit que ces forces se faisaient sensiblement équilibre.

La constante  $\Lambda$  doit être la même pour les deux équations d'après la condition

$$(1) \quad p_1 + p_2 = C''.$$

Comme  $p_1$  décroît quand  $x$  croît,

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} < 0;$$

or  $u_2 < 0$  et  $u_1 > 0$ , donc la constante  $\Lambda$  est positive.

On peut transformer l'équation (7) en remplaçant  $\delta_1$  et  $\delta_2$  donnés par l'équation (5)

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \Lambda d_1 d_2 \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \cdot \frac{1}{H_0^2} \cdot p_1 p_2 (u_2 - u_1).$$

Transformons le facteur  $p_1 p_2 (u_2 - u_1)$ ,

$$p_1 p_2 (u_2 - u_1) = p_1 p_2 u_2 - p_1 p_2 u_1;$$

mais l'équation (6) nous donne  $p_2 u_2 = -p_1 u_1$ , et tenant compte de la condition (1) :

$$p_1 p_2 (u_2 - u_1) = -p_1 u_1 (p_1 + p_2) = -p_1 u_1 H;$$

d'où la forme :

$$(8) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial x} = -\Lambda d_1 d_2 \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \frac{H}{H_0^2} p_1 u_1; \\ \text{et de même} \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = -\Lambda d_1 d_2 \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \frac{H}{H_0^2} p_2 u_2. \end{array} \right.$$

Si on pose

$$(9) \quad D = \frac{T_0^2 H_0^2}{T_0^2 H \Lambda d_1 d_2},$$

(coefficient de diffusion de Stefan) (\*), les équations (8) s'écrivent

$$(8') \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial x} = -\frac{1}{D} p_1 u_1, \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = -\frac{1}{D} p_2 u_2. \end{array} \right.$$

On peut leur donner d'autres formes. Par exemple partons toujours de l'équation

$$(7) \quad \frac{\partial p_1}{\partial x} = A (\delta_1 \delta_2 u_2 - \delta_1 \delta_2 u_1);$$

et tenons compte de (3)

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = A (v_2 d_2 \delta_1 - v_1 d_1 \delta_2);$$

mais

$$v_1 + v_2 = 0, \quad \text{ou} \quad v_2 = -v_1;$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A v_1 (d_2 \delta_1 + d_1 \delta_2).$$

En remplaçant  $\delta_1$  et  $\delta_2$  par leur valeur [équation (5)], il vient

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A v_1 \frac{d_1 d_2}{H_0} \frac{T_0}{T} (p_1 + p_2),$$

et d'après l'équation (1)  $p_1 + p_2 = H$ ,

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A v_1 \frac{d_1 d_2}{H_0} \frac{T_0}{T} \cdot H;$$

d'où une des formes données par Stefan

$$(10) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_1 = -\frac{H_0 T}{T_0 H A d_1 d_2} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x}; \\ \text{et de même} \\ v_2 = -\frac{H_0 T}{T_0 H A d_1 d_2} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} = -v_1. \end{array} \right.$$

---

3. En réalité les expériences de vérification donnent pour D une valeur proportionnelle à  $\left(\frac{T}{T_0}\right)^n$ , avec  $1,5 < n < 2$ , et non pas à  $\left(\frac{T}{T_0}\right)^2$ .

Il faut bien remarquer que ce n'est pas le coefficient de diffusion précédemment défini (\*) qui figure dans les formules (10).

On peut aussi chercher à évaluer l'intensité de la diffusion par la masse  $M_1$  du premier gaz qui traverse en une seconde la section droite.

L'équation (5) nous donne

$$p_1 = \frac{H_0 \cdot T}{d_1 \cdot T_0} \cdot \delta_1,$$

d'où en différentiant

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{H_0 T}{d_1 T_0} \frac{\partial \delta_1}{\partial x};$$

portant dans (10)

$$v_1 = - \frac{H_0^2 T^2}{T_0^2 H A d_1 d_2} \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x},$$

portant dans (3)  $M_1 = v_1 d_1$ , on obtient la formule de Szymkiewicz

$$M_1 = - \frac{H_0^2 T^2}{T_0^2 H A d_1 d_2} \frac{\partial \delta_1}{\partial x},$$

et en faisant figurer le coefficient de diffusion

$$(11) \quad \left\{ \begin{array}{l} D = \frac{H_0^2 T^2}{T_0^2 H A d_1 d_2}, \\ M_1 = - D \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x}, \\ \text{et pour le second gaz on a de même :} \\ M_2 = - D \frac{\partial \delta_2}{\partial x}. \end{array} \right.$$

Or  $-\frac{\partial \delta_1}{\partial x}$  est le gradient de la densité actuelle (gradient de la concentration)

4. Il semble que Stefan ait confondu ces deux coefficients, ainsi que l'avait signalé Schierbeck et comme l'a montré Szymkiewicz. En réalité on a en comparant les équations (9) et (10) :

$$\begin{aligned} v_1 &= - \frac{D}{H_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x}, \\ v_2 &= - \frac{D}{H_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x}. \end{aligned}$$

du gaz considéré : la masse du gaz qui traverse une section droite du cylindre est proportionnelle au gradient de la densité du gaz, proportionnelle au carré de la température absolue, et inversement proportionnelle à la pression totale à l'intérieur du cylindre.

On aurait pu aussi exprimer  $M_1$  en fonction de  $\frac{\partial p_1}{\partial x}$ . L'équation (10) nous donne immédiatement la deuxième formule de Szymkiewicz équivalente à (11)

$$(12) \quad \begin{cases} M_1 = -\frac{H_0 T}{T_0 HA d_2} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x}, \\ M_2 = -\frac{H_0 T}{T_0 HA d_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x}. \end{cases}$$

La masse du gaz qui traverse une section droite du cylindre est proportionnelle au gradient de la pression actuelle du gaz considéré, proportionnelle à la température absolue, et inversement proportionnelle à la pression totale à l'intérieur du cylindre.

Les formules (8), (10), (11), (12) sont des formes différentes de la même expression.

Nous pouvons aussi introduire l'équation de continuité de mouvement<sup>(5)</sup>.

Supposons que la diffusion s'effectue toujours dans le cylindre de section égale à l'unité. Considérons deux sections droites  $S_1$  et  $S_1'$  de ce cylindre aux abscisses respectives  $x_1$  et  $x_1 + dx$ , la densité du premier gaz<sup>(6)</sup> au voisinage de  $S_1$  étant  $\delta_1$ .

La vitesse du fluide à travers la section  $S_1$  est  $u_1$  à l'instant considéré. Le fluide qui a traversé cette section pendant un intervalle de temps  $dt$  a un volume  $u_1 dt$ ; par  $S_1$  est donc passée une masse de fluide  $\delta_1 u_1 dt$ ;  $\delta_1 u_1$  est donc la vitesse d'écoulement matériel (la vitesse de débit) à travers la surface  $S_1$ .

A travers la section  $S_1'$  cette vitesse de débit sera :

$$\delta_1 u_1 + \frac{\partial(\delta_1 u_1)}{\partial x} \cdot dx.$$

Pendant le temps  $dt$ , la masse de fluide sortie par  $S_1'$  sera :

$$\left[ \delta_1 u_1 + \frac{\partial(\delta_1 u_1)}{\partial x} dx \right] dt.$$

La différence  $\frac{\partial(\delta_1 u_1)}{\partial x} dx dt$  représente la diminution, pendant le temps  $dt$ , de la masse du fluide contenue dans le volume compris à l'intérieur du cylindre entre les sections  $S_1$  et  $S_1'$ .

5. Cf. BOUASSE (H.), *Mécanique physique*.

6. Ou plus généralement un fluide quelconque.

Cette variation de masse à l'intérieur du volume considéré correspond à une variation de densité du fluide égale à  $\frac{\partial \delta_1}{\partial t} \cdot dt$ ; la diminution de masse correspondante est pour le volume considéré (base  $1^{\text{cm}^2}$ , hauteur  $dx$ ) :

$$-\frac{\partial \delta_1}{\partial t} \cdot dt \cdot dx.$$

On égale :

$$-\frac{\partial \delta_1}{\partial t} dt dx = \frac{\partial(\delta_1 u_1)}{\partial x} dx dt,$$

d'où l'on tire :

$$(13) \quad \frac{\partial \delta_1}{\partial t} + \frac{\partial(\delta_1 u_1)}{\partial x} = 0.$$

Cette équation devient, en tenant compte de (5)

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial(p_1 u_1)}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = -\frac{\partial(p_1 u_1)}{\partial x}.$$

Différentions (8') par rapport à  $x$

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(p_1 u_1)}{\partial x}.$$

Combinons les deux dernières équations

$$(14) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2}; \end{array} \right.$$

$D$  étant toujours le coefficient de diffusion déjà défini. Les formules (14) ont été également données par Stefan.

Ces formules montrent que  $D$  a pour dimensions le quotient du carré d'une longueur par un temps. On peut par exemple exprimer  $D$  en centimètres carrés par seconde.

#### 4. Diffusion des vapeurs.

Stefan a rapproché les phénomènes de la vaporisation de ceux de la diffusion.

On suppose un cylindre vertical de  $r^2$  de section, contenant un liquide dont la surface libre, plane, est à la distance  $h$  de l'extrémité supérieure; celle-ci s'ouvre dans une atmosphère illimitée non saturée, mais contenant déjà de la vapeur du liquide à la pression partielle  $p$ ; la densité actuelle de la vapeur dans l'atmosphère est  $\delta$ . Au niveau du liquide, la pression partielle est égale à la tension maxima  $p'$  à la température de l'expérience; la densité (concentration) de la vapeur au voisinage immédiat de la surface du liquide est  $\delta'$ .

Cette vapeur se propage dans le cylindre; arrivée à l'ouverture, elle se dissipe dans l'air ambiant.

Au bout d'un certain temps, un régime stationnaire est établi: les mêmes quantités de vapeur passent par toutes les sections droites du cylindre pendant le même temps. La diffusion se produit comme dans le cas précédent (deux gaz), à cette différence près que les particules d'air à l'intérieur du cylindre ne se déplacent pas en sens inverse des molécules de vapeur d'eau.

Reprenons l'équation (7)

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = A \delta_1 \delta_2 (u_2 - u_1),$$

$x$  sera comptée ici suivant la verticale;

$\delta_1$  représentera la densité de la vapeur dans la section considérée;  $\delta_2$  la densité de l'air dans la même section;

$u_1$  sera la vitesse des particules de vapeur;

$u_2$  la vitesse des particules d'air; mais l'air étant immobile dans le cylindre on aura ici  $u_2 = 0$ ,

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A \delta_1 \delta_2 u_1;$$

on peut remplacer  $\delta_2$  tirée de (5)

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A d_2 \frac{T_0}{T} \frac{p_2}{H_2} \delta_1 u_1;$$

mais  $\delta_1 u_1 = M$  [équation (2)] est la masse de liquide qui s'évapore en une seconde

$$(15) \quad M = -\frac{H_2 T}{T_0 A d_2 p_2} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x};$$

or si  $H$  est la pression totale, qui a partout la même valeur à l'intérieur comme à l'extérieur du tube :

$$p_2 = H - p_1,$$

$$M = - \frac{H_0 T}{T_0 A d_2} \cdot \frac{1}{H - p_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x},$$

$$M = \frac{H_0 T}{T_0 A d_2} \cdot \frac{\partial \log (H - p_1)}{\partial x};$$

mais le phénomène a été supposé stationnaire : dans le même temps il passe la même quantité de vapeur à travers chaque section droite du tube : autrement dit  $M$  ne dépend pas de  $x$ . Puisqu'il en est ainsi, la dérivée de  $\log (H - p_1)$  doit aussi être indépendante de  $x$ . Pour la calculer, il suffit de prendre deux valeurs quelconques de la fonction  $\log (H - p_1)$ . La valeur de cette fonction est :

au voisinage de la surface du liquide  $\log (H - p')$ ;  
à l'orifice du cylindre  $\log (H - p)$ .

La distance qui sépare ces deux points est  $h$ , d'où

$$\frac{\partial \log (H - p_1)}{\partial x} = \frac{\log (H - p) - \log (H - p')}{h} = \frac{1}{h} \log \frac{H - p}{H - p'};$$

ce qui nous donnera pour  $M$

$$M = \frac{H_0 T}{T_0 A d_2} \cdot \frac{1}{h} \log \frac{H - p}{H - p'};$$

ou en multipliant haut et bas par  $d_1$  :

$$(16) \quad M = \frac{H_0 T}{T_0 A d_1 d_2} \cdot \frac{d_1}{h} \log \frac{H - p}{H - p'},$$

masse de liquide évaporée en une seconde.

On peut calculer le volume  $v_1$  de la vapeur sortant du cylindre en une seconde, supposée mesurée dans les conditions normales

$$(17) \quad v_1 = \frac{H_0 T}{T_0 A d_1 d_2} \cdot \frac{1}{h} \log \frac{H - p}{H - p'}.$$

Si nous posons

$$(9') \quad D_1 = \frac{H_0 T}{T_0 A d_1 d_2} = D \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{H}{H_0},$$

nous avons

$$(17') \quad v_1 = D_1 \cdot \frac{1}{h} \log \frac{H-p}{H-p'}$$

C'est la formule donnée par Stefan, et qu'il a vérifiée expérimentalement pour l'éther et le sulfure de carbone; elle a été vérifiée par Winkelmann (7) pour l'eau à diverses températures et sous diverses pressions. La concordance est assez bonne;  $h$  variant légèrement pendant l'expérience, on prend sa valeur moyenne.

Reprenons la formule :

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A d_1 \frac{T_0}{T} \frac{p_2}{H_0} \delta_1 u_1,$$

$\delta_1 u_1 = M = v_1' \delta_1'$  (en supposant que la vapeur est un gaz parfait);  $v_1'$  est le volume qui serait occupé par la masse de vapeur  $M$  si elle était mesurée sous la pression  $H$  et à la température  $T$ .

$\delta_1'$  serait la densité dans ces conditions. D'après (5)

$$\delta_1' = d_1 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{H}{H_0},$$

$$\delta_1 u_1 = \delta_1' v_1' = d_1 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{H}{H_0} v_1';$$

et en remplaçant  $\delta_1 u_1$  par cette valeur

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A d_1 d_2 \frac{T_0^2}{T^2} \cdot \frac{p_2}{H_0^2} \cdot H \cdot v_1';$$

$D$  étant le coefficient de diffusion, on a

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -\frac{1}{D} p_2 v_1'$$

Le calcul s'effectue ensuite comme précédemment

$$v_1' = -D \frac{1}{p_2} \frac{\partial p_1}{\partial x},$$

$$v_1' = -D \frac{1}{H-p_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial \log (H-p_1)}{\partial x};$$

---

7. WINKELMANN : Ueber die Diffusion von Gasen und Dämpfen (Wied. Ann., 1884);  
— Id. : Die Verdampfung (id., 1888).

$v_1'$  est indépendant de  $x$  donc  $\frac{\partial \log(H - p_1)}{\partial x}$  est également indépendant de  $x$ ; on le calcule par les conditions aux limites.

$$(18) \quad v_1' = D \cdot \frac{1}{h} \log \frac{H - p}{H - p'}$$

Si on suppose le volume de la vapeur mesuré sous la pression de l'atmosphère de l'expérience, et à la température de l'expérience, c'est le coefficient de diffusion qui intervient.

On voit donc ici d'où provient la confusion entre les coefficients  $D$  et  $D_1$  : c'est que les deux volumes  $v_1$  et  $v_1'$  ne sont pas mesurés dans les mêmes conditions.

Nous pouvons vérifier cette formule en calculant  $v_1'$  à partir de  $v_1$ ;  $v_1$  était supposé mesuré dans les conditions normales  $H_0, T_0$ ;  $v_1'$  mesuré sous la pression  $H$  et à la température  $T$ . La loi de Mariotte Gay-Lussac nous donne la relation

$$H v_1' = H_0 v_1 \frac{T}{T_0};$$

d'où

$$\frac{v_1'}{v_1} = \frac{H_0}{H} \cdot \frac{T}{T_0};$$

c'est-à-dire

$$\frac{v_1'}{v_1} = \frac{D}{D_1}.$$

On peut aussi exprimer  $M$  en fonction du gradient de la concentration. Reprenons l'équation (15)

$$M = - \frac{H_0 T}{T_0 A d_1 p_1} \frac{\partial p_1}{\partial x};$$

d'après l'équation (5) on a

$$p_1 = \delta_1 \cdot \frac{H_0}{d_1} \cdot \frac{T}{T_0},$$

et en différentiant

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{H_0}{d_1} \cdot \frac{T}{T_0} \frac{\partial \delta_1}{\partial x},$$

d'où en remplaçant

$$M = - \frac{H_0^2 T^2}{T_0^2 A d_1 d_1} \cdot \frac{1}{p_1} \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x},$$

et en introduisant le coefficient de diffusion

$$M = -D \cdot \frac{H}{p_2} \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x};$$

on a toujours  $p_2 = H - p_1$ ;

$$(19) \quad M = -D \cdot \frac{H}{H - p_1} \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x}.$$

Puisque  $M$  est constant à travers chaque section du cylindre, le gradient de concentration augmente lorsqu'on s'approche de l'ouverture du cylindre : en effet  $p_1$  diminue (de  $p'$  à la surface du liquide, jusqu'à  $p$  à l'orifice du cylindre) donc  $H - p_1$  augmente et  $\frac{H}{H - p_1}$  diminue. Le coefficient  $D$  est constant dans les conditions données; il faut que le terme  $\frac{\partial \delta_1}{\partial x}$  augmente.

Nous pouvons encore chercher à transformer les formules (16), (17), (18) en développant  $\log \frac{H - p}{H - p'}$  en série.

On écrira d'abord

$$\log \frac{H - p}{H - p'} = \log \left( 1 + \frac{p' - p}{H - p'} \right);$$

$H$  est supérieur de beaucoup à  $p'$  et à  $p$  dans le cas qui nous intéresse

$$\frac{p' - p}{H - p'} < 1;$$

on peut écrire dans ce cas

$$\log \frac{H - p}{H - p'} = \frac{p' - p}{H - p'} - \frac{1}{2} \left( \frac{p' - p}{H - p'} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{p' - p}{H - p'} \right)^3 \dots$$

Dans le cas de l'eau s'évaporant à l'air libre dans les conditions naturelles,  $p$  et  $p'$  sont très petites par rapport à la pression barométrique  $H$  : on peut négliger tous les termes de la série à partir du deuxième; on a donc avec une approximation suffisante

$$\log \frac{H - p}{H - p'} = \frac{p' - p}{H - p'}.$$

La formule (16) devient

$$(20) \quad M = \frac{H_0 T}{T_0 A d_1 d_2} \frac{d_1}{h} \frac{p' - p}{H - p'},$$

et en mettant en évidence le coefficient de diffusion

$$M = D \cdot \frac{T_0 H}{H_0 T} \cdot \frac{d_1}{h} \cdot \frac{p' - p}{H - p'}.$$

Mais :

$$d_1 \frac{T_0}{H_0 T} p' = \delta' \quad \text{densité de la vapeur au voisinage de la surface évaporante;}$$

$$d_1 \frac{T_0}{H_0 T} \cdot p = \delta \quad \text{densité de la vapeur à l'orifice du cylindre.}$$

On a pour expression de M

$$(21) \quad M = D \cdot \frac{H}{H - p'} \cdot \frac{\delta' - \delta}{h}.$$

Si on identifie les deux expressions de M [équations (19) et (21)]

$$-\frac{1}{H - p_1} \frac{\partial \delta_1}{\partial x} = \frac{1}{H - p'} \frac{\delta' - \delta}{h};$$

$$-\frac{\partial \delta_1}{\partial x} = \frac{H - p_1}{H - p'} \cdot \frac{\delta' - \delta}{h}.$$

Pour  $x = 0$ ,  $p_1 = p'$ ; le gradient de concentration près de la surface du liquide est :

$$\left( -\frac{\partial \delta_1}{\partial x} \right)_0 = \frac{\delta' - \delta}{h}.$$

Pour l'orifice du cylindre  $x = h$ ,  $p_1 = p$ ; le gradient de concentration de la vapeur à l'orifice est :

$$\left( -\frac{\partial \delta_1}{\partial x} \right)_h = \frac{H - p}{H - p'} \cdot \frac{\delta' - \delta}{h},$$

$p' > p$ ; le facteur  $\frac{H - p}{H - p'}$  est plus grand que 1 : le gradient de concentration est plus élevé à l'orifice qu'à la surface du liquide, ce qui concorde avec le résultat que nous avons déduit de l'équation (19).

## B) Généralisation.

## 1. L'équation de continuité.

Dans l'étude particulière que nous venons de faire en suivant le mode de raisonnement de Stefan et de Szymkiewicz, on supposait que la diffusion s'effectuait à l'intérieur d'un cylindre très long de  $1\text{cm}^2$  de section. On peut faire une étude générale, la diffusion se produisant dans un espace de forme quelconque.

Soit un fluide en mouvement. On considère trois axes de coordonnées rectangulaires  $Ox, Oy, Oz$ , et un point A de coordonnées  $x, y, z$ . Soient  $u, v, w$ , les composantes de la vitesse du petit élément de fluide qui se trouve au point A à l'instant  $t$ . Les quantités  $u, v, w$ , sont des fonctions de  $x, y, z$  et  $t$ .

La cinématique du fluide sera définie pour nous si nous connaissons ces fonctions ainsi que l'état du fluide qui passe en tout point à chaque instant : cela revient à connaître la densité  $\delta$  en fonction de  $x, y, z, t$ .

Les fonctions  $u, v, w$  ne peuvent être prises arbitrairement : il existe entre elles une relation qui est l'équation de continuité. On l'établit au début de tous les cours d'hydrodynamique<sup>(\*)</sup>.

Voici comment on peut arriver à cette relation.

A travers un petit élément de surface  $ds$  tracé dans le fluide, il passe, dans le temps  $dt$ , un volume de fluide mesuré par le flux à travers  $ds$  du vecteur de composantes  $u dt, v dt, w dt$ .

La quantité de matière qui passe à travers  $ds$  dans le même temps est mesurée par le flux du vecteur de composantes  $\delta u dt, \delta v dt, \delta w dt$ .

La divergence du vecteur J, de projections  $\delta u, \delta v, \delta w$ , est par définition :

$$\text{Div. J} = \frac{\partial(\delta u)}{\partial x} + \frac{\partial(\delta v)}{\partial y} + \frac{\partial(\delta w)}{\partial z}.$$

D'après le théorème de Green, étant donnée une surface fermée quelconque renfermant à son intérieur un volume V, le flux  $\Phi$  d'un vecteur J à travers cette surface, en représentant par  $d\omega$  un élément de volume, est :

$$\Phi = \iiint_V (\text{Div. J}) d\omega;$$

l'intégrale étant étendue à tout le volume.

Appliquons ici; la masse correspondant au flux du vecteur  $(\delta u dt, \delta v dt, \delta w dt)$  est :

$$\iiint (\text{Div. J}) d\omega dt = dt \iiint (\text{Div. J}) d\omega.$$

---

8. Voir par exemple la démonstration classique dans : BOUASSE. *Cours de Physique; Hydrodynamique*.

D'autre part comme  $\delta$  est une fonction de  $x, y, z, t$ , nous pourrons écrire pour expression de la masse (signe moins, car la densité  $\delta$  varie en sens inverse de la masse qui sort) :

$$-\delta d\omega = -dt \frac{\partial}{\partial t} \iiint \delta d\omega = -dt \iiint \frac{\partial \delta}{\partial t} d\omega.$$

Egalons les deux expressions de la masse

$$-dt \iiint \frac{\partial \delta}{\partial t} d\omega = dt \iiint (\text{Div. } \mathbf{J}) d\omega,$$

d'où en intégrant pour le volume considéré

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \text{Div.} (\delta u, \delta v, \delta w) = 0;$$

c'est-à-dire

$$(23) \quad \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial (\delta u)}{\partial x} + \frac{\partial (\delta v)}{\partial y} + \frac{\partial (\delta w)}{\partial z} = 0.$$

C'est l'équation générale de continuité.

## 2. Expression de la loi de Dalton dans le cas de la diffusion de deux gaz.

La marche du raisonnement est la même que celle que nous avons suivie dans le cas particulier du cylindre. Nous conserverons les mêmes notations. Pour simplifier, nous supposons que la diffusion se fait suivant  $Ox$ , et que l'état permanent est atteint : il y a équilibre apparent. La température absolue  $T$  et la pression totale  $H$  sont les mêmes dans tout l'espace offert aux deux gaz (on néglige l'action de la pesanteur).

Les pressions partielles des deux gaz,  $p_1$  et  $p_2$ , sont assujetties à la condition :

$$(1) \quad p_1 + p_2 = H = \text{constante.}$$

Les gaz étant considérés comme parfaits, nous pouvons encore écrire les relations :

$$(4) \quad \frac{\partial_1 u_1}{d_1} + \frac{\partial_2 u_2}{d_2} = 0;$$

$$(5) \quad \begin{cases} \delta_1 = d_1 \frac{T_0}{T} \frac{p_1}{H_0}, \\ \delta_2 = d_2 \frac{T_0}{T} \frac{p_2}{H_0}; \end{cases}$$

d'où l'expression de la loi de Dalton (la pression totale reste constante dans le temps, malgré les déplacements des gaz)

$$(6) \quad p_1 u_1 + p_2 u_2 = 0.$$

### 3. Expression de la force motrice et application de l'équation de continuité.

On fait encore l'hypothèse que dans chaque gaz la force motrice est proportionnelle à la variation de pression partielle, et que la résistance au mouvement est proportionnelle à la vitesse relative et au produit des masses spécifiques actuelles des deux gaz.

Les déplacements étant très lents, on pourra écrire que ces forces sont en équilibre :

$$(7 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial x} = A \delta_1 \delta_2 (u_1 - u_2), \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = A \delta_1 \delta_2 (u_1 - u_2). \end{array} \right.$$

Si  $p_1$  croît quand  $x$  augmente,  $u_1$  est négatif et  $u_2$  positif; la constante  $A$  qui doit être la même pour les deux gaz [d'après la condition (1)] est positive.

Nous pouvons encore écrire en combinant les équations (6) et (7 bis)

$$(8 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial x} = -A d_1 d_2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \frac{H}{H_0^2} p_1 u_1, \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = -A d_1 d_2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \frac{H}{H_0^2} p_2 u_2; \end{array} \right.$$

en posant

$$D = \frac{H_0}{A d_1 d_2} \times \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \times \frac{H_0}{H},$$

les équations (8 bis) s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_1}{\partial x} &= -\frac{1}{D} p_1 u_1, \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} &= -\frac{1}{D} p_2 u_2. \end{aligned}$$

L'équation générale de continuité de l'hydrodynamique devient ici

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial t} + \frac{\partial (\delta_1 u_1)}{\partial x} = 0, \quad [\text{Cf. équation (13).}]$$

et tenant compte de (5)

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial(p_1 u_1)}{\partial x} = 0.$$

En différentiant les équations (8 bis) par rapport à  $x$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} &= -\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial(p_1 u_1)}{\partial x}, \\ \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2} &= -\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial(p_2 u_2)}{\partial x}; \end{aligned}$$

et tenant compte de l'équation précédente, il vient

$$(14 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_1}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2}; \end{array} \right.$$

Le coefficient de diffusion  $D$  est indépendant de la concentration relative (c'est-à-dire de  $p_1$  et  $p_2$  pris isolément); il est proportionnel au carré de la température absolue  $T$  et en raison inverse de la pression totale  $H$ .

#### 4. Cas de l'évaporation.

Soit un liquide contenu dans un tube de section quelconque, la surface du liquide étant à une distance  $h$  au-dessous du bord libre. L'atmosphère en dehors du tube est supposée constamment renouvelée; la pression partielle de la vapeur  $y$  est constante. L'axe  $Ox$  est pris verticalement.

L'air ne se déplace pas dans le tube en sens inverse de la vapeur, donc  $u_2 = 0$ .

L'équation (7 bis) donne :

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A \delta_1 \delta_2 u_1,$$

et tenant compte de (5)

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -A d_2 \frac{T_0}{T} \frac{p_2}{H_0} \delta_1 u_1;$$

$\delta_1 u_1$  est la masse de liquide évaporé en une seconde par  $\text{cm}^2$ . Le calcul se fait ensuite aisément comme pour l'établissement de la formule (18). On arrive aux mêmes formules par unité de surface que celles que nous avons établies.

## C) Autre méthode.

## 1. Les formules fondamentales.

Le plus souvent les auteurs qui se sont occupés de l'évaporation se sont servis de l'analogie des équations avec celles de l'électrostatique; ils ont noté l'analogie avec le transport de la chaleur mais ils ne l'ont pas utilisée systématiquement; je vais montrer que cela est parfaitement faisable. On peut jusqu'à un certain point comparer l'évaporation en atmosphère calme avec la conduction thermique dans un milieu isotrope. Nous allons calquer notre raisonnement sur celui employé pour l'étude du transport de la chaleur<sup>9)</sup>.

Considérons une atmosphère dans laquelle se diffuse de la vapeur. Pour un point de coordonnées  $x, y, z$ , la pression actuelle de la vapeur a une certaine valeur. Si à un instant  $t$  on trace les surfaces, lieux des points où la pression partielle de la vapeur a la même valeur  $p_1$ , on a un faisceau de surfaces « isohygrobares »  $S$ , définies par

$$p_1(x, y, z, t) = C^{10}.$$

Cela suppose seulement que  $p_1$  varie d'une façon continue. Si ces surfaces sont indépendantes du temps  $t$ , on a un état permanent.

On peut admettre que la vapeur s'écoule suivant la normale aux surfaces  $S$ , proportionnellement au taux de diminution de la pression partielle suivant cette normale à l'instant considéré, et proportionnellement à un certain paramètre  $K$ <sup>10)</sup>.

Soit un point  $A$  de l'atmosphère, et la surface  $S$  passant par ce point. Sur la normale  $AN$  à cette surface, on prend une origine  $O$ ; les points  $N$  de cette normale seront déterminés par la distance  $ON = n$ . Le long de cette normale  $p_1$  est fonction de  $n$ .

Si on considère sur la surface  $S$  un élément de surface  $dS$  entourant le point  $A$ , à travers  $dS$  s'écoule dans l'unité de temps une masse de vapeur  $dm$  :

$$dm = -K \frac{\partial p_1}{\partial n} dS,$$

elle est proportionnelle à  $dS$ , et au taux de diminution  $-\frac{\partial p_1}{\partial n}$  de la pression partielle, suivant la normale, à l'instant considéré; et aussi au paramètre  $K$ . Le signe  $-$  traduit le fait que la vapeur se meut dans le sens des  $p_1$  décroissants.

9. Cf. BOUASSE (H.), *Thermodynamique*.

10. Le paramètre  $K$  correspond à la conductibilité, dans le cas de la chaleur.

La vitesse d'écoulement matériel correspondante est :

$$U_i = \frac{dm}{dS} = -K \frac{\partial p_i}{\partial n}.$$

Ce vecteur a pour origine les points des surfaces isohygrobares et pour direction les normales en ces points. De même que dans le cas de la chaleur, on pourra considérer des lignes d'écoulement, qui sont en tous points normales aux surfaces  $S$  pour l'instant considéré; ces lignes d'écoulement sont en chacun de leurs points tangentes au vecteur  $U_i$ .

*Écoulement dans une direction quelconque.*

Supposons les axes rectangulaires.

Si  $p_i(x, y, z) = C^c$  est une surface quelconque, en comptant  $n$  suivant la normale à cette surface

$$\left(\frac{\partial p_i}{\partial n}\right)^2 = \left(\frac{\partial p_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_i}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_i}{\partial z}\right)^2.$$

Si  $u_i, v_i, w_i$  sont les composantes de la vitesse  $U_i$  suivant les axes rectangulaires, on a :

$$u_i = -K \frac{\partial p_i}{\partial x},$$

$$v_i = -K \frac{\partial p_i}{\partial y},$$

$$w_i = -K \frac{\partial p_i}{\partial z}.$$

Mais on peut prendre  $Ox$  quelconque : si  $dS$  est un élément de surface normal à cette direction  $Ox$ , on a pour l'expression de la masse de vapeur qui traverse la surface  $dS$  pendant un temps égal à l'unité

$$dm = u_i dS = -K \frac{\partial p_i}{\partial x} dS.$$

*Équation indéfinie de la conductibilité.*

L'excès de vapeur qui entre pendant le temps  $dt$  dans un volume élémentaire  $d\omega$ , sur la vapeur qui sort de ce volume pendant le même temps est :

$$(24) \quad \frac{\partial m}{\partial t} dt = -\text{Div}(u_i, v_i, w_i) d\omega dt.$$

Mais par définition

$$\text{Div}(u_i, v_i, w_i) = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{\partial w_i}{\partial z}.$$

Cette variation de la masse de vapeur à l'intérieur du volume  $d\omega$  correspond à une variation de la pression partielle de la vapeur  $dp_i$  dans ce volume;  $p_i$  est fonction de  $x, y, z, t$ ; ici on considère  $x, y, z$  comme fixes

$$\frac{\partial m}{\partial t} dt = K' \frac{\partial p_i}{\partial t} dt \cdot d\omega.$$

En égalant

$$(25) \quad \begin{aligned} - \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) d\omega dt &= K' \frac{\partial p_i}{\partial t} d\omega dt; \\ - \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) &= K' \frac{\partial p_i}{\partial t}; \end{aligned}$$

tenant compte des expressions telles que  $u_i = -K \frac{\partial p_i}{\partial x}$

$$(26) \quad - \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) = K \left( \frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_i}{\partial z^2} \right).$$

Or

$$\frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_i}{\partial z^2} = \Delta p_i,$$

par définition est la laplacienne de  $p_i$ .

On a donc :

$$(26') \quad - \text{Div } U_i = K \cdot \Delta p_i,$$

d'où en portant dans l'équation (25) et posant  $K_i = \frac{K}{K'}$

$$(27) \quad K_i \Delta p_i = \frac{\partial p_i}{\partial t}.$$

Si l'état est permanent on aura :

$$\Delta p_i = 0.$$

L'équation (27) suppose que  $K_i$  est indépendant de  $p_i$ . Si  $K_i$  était fonction de  $p_i$ , l'équation (27) deviendrait :

$$K_i \Delta p_i + \frac{dK_i}{dp_i} \left[ \left( \frac{\partial p_i}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial p_i}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial p_i}{\partial z} \right)^2 \right] = K' \frac{\partial p_i}{\partial t}.$$

Nous admettrons toujours que  $K$  et  $K_i$  ne dépendent pas de  $p_i$ .

## 2. Expression des paramètres $K_1$ , $K$ et $K'$ .

Nous pourrions pousser notre étude sans nous préoccuper de la valeur de  $K$  et de  $K_1$ . Cependant, afin de relier notre calcul à ce qui précède, nous allons chercher une relation entre ces paramètres et le coefficient de diffusion déjà défini.

Considérons le cas où la vapeur se déplace suivant une direction  $Ox$ .

L'équation (14) s'écrivait :

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2}.$$

L'équation (27) s'écrit dans le même cas

$$K_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t}.$$

Nous avons donc immédiatement

$$(28) \quad K_1 = D.$$

Prenons maintenant l'expression de la masse de vapeur; par exemple la formule (12) nous donne :

$$(12) \quad M_1 = - \frac{T H_0}{T_0 H A d_2} \frac{\partial p_1}{\partial x};$$

cela correspondait à  $1 \text{ cm}^2$ .

Comparons avec l'équation que nous avons écrite

$$dm = - K \frac{\partial p_1}{\partial x} dS.$$

On voit immédiatement que l'on a

$$(29) \quad \left\{ \begin{array}{l} K = \frac{T H_0}{T_0 H A d_2}, \\ \text{qui peut s'écrire :} \\ K = D \cdot \frac{d_1 T_0}{H_0 T}, \\ \text{ou encore :} \\ K = D_1 \cdot \frac{d_1}{H}. \end{array} \right.$$

Des valeurs trouvées pour  $K_1$  et  $K$  on tire immédiatement  $K'$

$$K' = \frac{K}{K_1} = \frac{d_1 T_0}{H_0 T}.$$

### 3. Cas d'une surface évaporante plane indéfinie.

#### a) *État permanent.*

Soit une surface libre indéfinie, à la température  $T'$ , correspondant à la pression maximum de la vapeur  $p'$ . L'évaporation se produit dans une atmosphère telle que la pression partielle du liquide, à la distance  $h$  de la surface libre, soit  $p_i'$ . On cherche la répartition des pressions partielles de la vapeur, dans l'état permanent (c'est l'analogie du problème du mur dans l'étude de la conduction thermique).

Prenons l'axe  $Ox$  normal à la surface évaporante. Puisqu'on suppose l'état permanent, les surfaces isohygrobares sont indépendantes du temps.

L'équation (27) nous donne

$$K_i \Delta p_i = 0,$$

soit

$$\Delta p_i = 0;$$

c'est-à-dire :

$$\frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} = 0.$$

Puisque la dérivée seconde est nulle, c'est que la dérivée première est une constante, soit

$$\frac{\partial p_i}{\partial x} = a,$$

et en désignant par  $b$  une autre constante

$$p_i = ax + b.$$

Pour  $x = 0$  (surface libre) on doit avoir  $p_i = p'$  et pour  $x = h$  on doit avoir  $p_i = p_i'$ , d'où

$$b = p',$$

$$a = \frac{p_i' - p'}{h};$$

et finalement

$$p_i = \frac{p_i' - p'}{h} x + p',$$

(30)

$$p_i = p' - \frac{p' - p_i'}{h} x.$$

Les surfaces isohygrobares sont donc des plans parallèles à la surface donnée.

La masse de vapeur qui traverse dans l'unité de temps l'unité de surface d'une quelconque des surfaces isohygrobares est :

$$M_1 = -K \frac{\partial p_1}{\partial x} = +K \cdot \frac{p' - p_1'}{h}.$$

Elle est proportionnelle à la différence des pressions extrêmes et inversement proportionnelle à la distance  $h$ ; autrement dit, elle est proportionnelle au gradient de la tension de vapeur.

Naturellement cette solution est applicable à un cylindre contenant un liquide qui s'évapore<sup>(11)</sup>, la distance du niveau du liquide à l'orifice est  $h$ , la pression maximum de la vapeur à la température du liquide  $p'$ , et la pression de cette vapeur dans l'atmosphère à l'orifice du tube  $p_1'$ .

On peut à partir de là donner une définition physique du coefficient  $K$  : ce sera par exemple la masse en grammes du liquide évaporé en une seconde par 1<sup>cm</sup><sup>2</sup> de la surface libre, lorsque le gradient des tensions de vapeur est de 1<sup>mm</sup> de mercure par centimètre.

b) *État variable.*

Soit toujours une surface évaporante plane indéfinie. On suppose qu'au début de l'expérience la pression partielle de la vapeur dans l'atmosphère est nulle<sup>(12)</sup>. A l'instant  $t = 0$ , la surface commence à évaporer : la tension de la vapeur au voisinage de la surface est  $p'$ , qui restera constante.

L'équation indéfinie à satisfaire est :

$$(27) \quad K_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t}.$$

Ou si l'on préfère, tenant compte de (28) on retrouve la forme

$$(14) \quad D \cdot \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t}.$$

Les surfaces isohygrobares sont des plans parallèles à la surface évaporante.

La solution d'une telle équation est, en posant  $X = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$  :

$$(31) \quad p_1 = p' \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-x^2} dx \right].$$

11. On retrouve ainsi la formule (20), à condition de négliger dans celle-ci  $p'$  vis-à-vis de  $H$ , ce qui est légitime pour le cas de l'eau s'évaporant dans les conditions naturelles.

12. Si elle n'était pas nulle, et si sa valeur était  $p_0$ , il suffirait de remplacer  $p'$  par  $p' - p_0$  et  $p_1$  par  $p_1 - p_0$ .

Vérifions-la pour des cas particuliers.

Pour  $X = 0$ , le second terme est nul; cela se produit soit pour  $x = 0$  (quelque soit  $t$  sauf  $t = 0$ ), ou pour  $t = \infty$  (pour toute valeur finie de  $x$ ); dans ces conditions on a bien  $p_1 = p'$ .

Si on a  $t = 0$  (quelque soit  $x$  sauf  $x = 0$ ), cela entraîne  $X = \infty$ ; or

$$\int_0^{\infty} e^{-X^2} dX = \frac{\sqrt{\pi}}{2};$$

le terme entre crochets est nul, et on doit avoir en effet  $p_1 = 0$  d'après l'énoncé.

On peut calculer la masse de vapeur émise par une portion  $S$  de la surface évaporante pendant le temps  $t$ . On a :

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{\partial p_1}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial x} = -\frac{2 p'}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} \cdot \frac{1}{2 \sqrt{Dt}}.$$

Pour  $x = 0$  on a  $X = 0$ , c'est-à-dire, à la surface

$$\left( \frac{\partial p_1}{\partial x} \right)_{x=0} = -\frac{p'}{\sqrt{\pi Dt}}.$$

Or on a :

$$dm = -K \frac{\partial p_1}{\partial x} dS,$$

$$m = -\int_0^t K \frac{\partial p_1}{\partial x} S \cdot dt = -KS \int_0^t \frac{\partial p_1}{\partial x} \cdot dt;$$

ici :

$$m = + \frac{KS p'}{\sqrt{\pi D}} \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}},$$

$$(32) \quad m = \frac{2 KS p'}{\sqrt{\pi D}} \cdot \sqrt{t}.$$

En tenant compte de (28) on a :

$$\frac{K}{\sqrt{D}} = \sqrt{\frac{d_1}{HA d_2}} = \sqrt{\frac{K d_1 T_0}{H_0 T}},$$

ce qui nous permet d'écrire d'autres expressions de la valeur de  $m$

$$(32 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} m = 2 \sqrt{\frac{K d_1 T_0}{\pi H_0 T}} \cdot S \cdot p' \sqrt{t}, \\ m = 2 \sqrt{\frac{d_1}{\pi HA d_2}} \cdot S \cdot p' \cdot \sqrt{t}. \end{array} \right.$$

Donc pendant l'état variable, une portion d'un plan évaporant dans une atmosphère qui était sèche à l'origine des temps, émet une quantité de vapeur proportionnelle à la racine carrée du temps.

Considérons l'instant où en un point situé à la distance  $x_1$  de la surface, la pression de la vapeur a une certaine valeur  $p_1''$ . On a, d'après  $X = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$  :

$$x_1 = 2 X_1 \sqrt{D} \cdot \sqrt{t};$$

$X$  prend une valeur déterminée  $X_1$ , d'autant plus petite que  $p_1''$  est plus grand;  $2 X_1 \sqrt{D}$  étant constant, la courbe représentant la relation entre  $x$  et  $t$  est une parabole pour la valeur  $p_1''$ . Si on considère une autre valeur  $p_1''' > p_1''$  on a une autre parabole.

c) *État variable périodique.*

On suppose toujours un plan évaporant indéfini. La tension maximum correspondant à la surface est supposée à chaque instant uniforme, mais variable avec le temps. L'axe  $Ox$  est perpendiculaire à cette surface. La pression de la vapeur dans l'atmosphère est supposée égale à  $p_1'$ . Les surfaces isohygrobares sont encore des plans parallèles à la surface évaporante. L'équation indéfinie à satisfaire est :

$$(27) \quad K_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t},$$

qui peut se mettre sous la même forme que dans le cas précédent

$$D \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t}.$$

Considérons le cas très simple qui consiste à supposer que, sur le plan évaporant, on a pour la tension de vapeur

$$p' = p_1' + p_0' \sin \omega t;$$

$p_1'$  et  $p_0'$  étant deux constantes, avec  $p_0' < p_1'$ . La tension de vapeur à la surface oscille donc autour de la valeur moyenne  $p_1'$  entre les valeurs limites  $p_1' + p_0'$  et  $p_1' - p_0'$ .

D'après le cas analogue classique dans l'étude de la conduction thermique, l'équation différentielle précédente est satisfaite par la fonction suivante<sup>(13)</sup> :

$$(33) \quad \begin{aligned} p_1 &= p_1' + p_0' e^{-\frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{\omega}{2}}} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{\omega}{2}} \right); \\ p_1 &= p_1' + p_0' e^{-x \sqrt{\frac{\omega}{2D}}} \sin \left( \omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \right). \end{aligned}$$

Si  $\tau$  est la période

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{\tau}; \\ \sqrt{\frac{\omega}{2D}} &= \sqrt{\frac{\pi}{D\tau}}. \end{aligned}$$

Si l'on considère l'amplitude de la variation de la tension de la vapeur en un point situé à la distance  $h$  de la surface, on voit que cette amplitude décroît suivant une progression géométrique en fonction de  $h$ .

L'amplitude est :

$$p_0' e^{-h \sqrt{\frac{\omega}{2D}}} = p_0' e^{-h \sqrt{\frac{\pi}{D\tau}}},$$

donc la raison de la progression est proportionnelle à  $\frac{1}{\sqrt{D\tau}}$ .

L'influence de la variation périodique qui se produit à la surface se fait sentir à une distance donnée  $h$  d'autant moins que la période de la variation est plus courte.

La courbe représentant  $p_1$  en fonction de  $x$  est une sinusoïde amortie, ayant pour axe la droite, parallèle à  $Ox$ , correspondant à  $p_1'$ . Tout se passe comme si les tensions moyennes (zéros du sinus) se propageaient avec une vitesse constante

$$V = \sqrt{\frac{4\pi D}{\tau}}.$$

Cette vitesse augmente si  $D$  augmente. Elle augmente aussi quand la période diminue; il faut remarquer que l'amortissement devient aussi plus grand quand la période diminue.

Le cas que nous venons de considérer était très simple. Dans le cas où la variation de tension de vapeur à la surface est une fonction périodique quelconque, il suffit

---

13. Cf. BOUSSE (H.), *Thermodynamique*.

de la développer en série de Fourier; on a ainsi une somme de fonctions sinusoïdales. Puisque l'équation aux dérivées partielles est linéaire, la solution complète est la somme des solutions correspondant à chacun des termes de la série. Le phénomène résultant est la superposition d'un certain nombre de phénomènes analogues au précédent, de périodes  $\frac{\tau}{n}$  (où  $n$  représente un nombre entier), affectés de coefficients appropriés et convenablement décalés les uns par rapport aux autres.

En particulier les courbes représentant l'humidité de l'air en fonction du temps, au cours des expériences sur les plantes, que je relate dans ce travail, sont du type des courbes crénelées classiques. Elles sont représentables par des séries de la forme

$$y = A \left( \frac{\pi}{4} + \sin t - \frac{1}{3} \sin 3t + \frac{1}{5} \sin 5t - \dots \right).$$

Malheureusement ces séries sont peu convergentes, et le calcul, pour présenter quelque utilité, obligerait à prendre un nombre élevé de termes. Aussi je n'insisterai pas davantage.

#### 4. Cas d'une petite surface évaporante plane dans une atmosphère illimitée.

Soit une petite surface horizontale évaporante  $s$ . La tension de la vapeur est  $p_1'$ , à la distance  $x = h$  comptée suivant la normale à la surface; la tension de la vapeur sur la surface  $s$  est  $p_2$  (ou plus exactement son excès sur la tension de vapeur dans l'atmosphère). L'équation :

$$D \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{\partial p_1}{\partial t}$$

ne suffit plus, car elle suppose que la vapeur reste à l'intérieur du cylindre vertical ayant pour base la surface évaporante.

On peut toujours imaginer que l'évaporation se produit dans ce cylindre, mais que les faces latérales de ce cylindre fictif laissent échapper de la vapeur. La surface  $s$  étant petite, on pourra considérer la pression  $p_1$  de la vapeur comme uniforme à chaque instant dans chaque section droite du cylindre : les surfaces isohygrobares à l'intérieur du cylindre fictif seront les sections droites.

On peut admettre que l'émission de vapeur à travers la surface latérale du cylindre est proportionnelle à cette surface et à l'excès de pression partielle de la vapeur sur celle du milieu extérieur. Soit  $l$  le périmètre de la section droite.

La quantité de vapeur qui entre pendant le temps  $dt$  dans la portion de cylindre limitée par deux sections droites de cotes  $x$  et  $x + dx$  est :

$$K \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} s dx.$$

Une partie de cette vapeur produit un accroissement de pression à l'intérieur du volume considéré

$$K' \frac{\partial p_1}{\partial t} s dx.$$

Une partie se perd par la surface latérale; si  $p_1$  est l'excès de la pression de la vapeur dans la portion de cylindre considéré sur la pression de la vapeur à l'extérieur, il s'évapore par la surface latérale du cylindre fictif  $K p_1 l dx$  (c'est la même constante  $K$  qui intervient, différence avec le problème de la barre pour la conduction thermique). Finalement on a :

$$K \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} s dx = K' \frac{\partial p_1}{\partial t} s dx + K p_1 l dx,$$

$$K \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} \cdot s = K' \frac{\partial p_1}{\partial t} \cdot s + K p_1 l.$$

Dans l'état permanent :

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = 0,$$

et il reste

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{l}{s} p_1.$$

L'intégrale générale de cette équation est :

$$p_1 = A e^{bx} + B e^{-bx}$$

en posant  $\frac{l}{s} = b^2$ .

Pour  $x = 0$ ,  $p_1$  prend la valeur  $p_2$ , donc

$$A + B = p_2.$$

Pour  $x = h$ ,  $p_1$  prend la valeur  $p_1'$

$$p_1' = A e^{bh} + B e^{-bh}.$$

Nous supposons que  $h$  est grand;  $p_1'$  ayant une valeur finie, le produit  $bh$  étant très grand, il faut nécessairement que  $A$  soit négligeable. Il restera :

$$B = p_2;$$

$$p_1 = p_2 e^{-bx} = p_2 e^{-\sqrt{\frac{l}{s}} x}$$

Il est évident, d'autre part, qu'à une certaine hauteur la tension de la vapeur à l'intérieur du cylindre fictif est nécessairement égale à celle de l'atmosphère.

L'exponentielle décroît rapidement comme le montre le tableau suivant :

$bx$	0	0,1	1	2	3	4	5
$e^{-bx}$	1	0,905	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007

L'excès de tension de la vapeur dans le cylindre fictif sur la tension dans l'atmosphère diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la surface.

Évaluons maintenant la masse de liquide évaporé; on a toujours pour expression de la masse qui traverse, dans l'unité de temps, une surface  $dS$

$$dm = -K \frac{\partial p_1}{\partial x} dS.$$

Calculons  $\frac{\partial p_1}{\partial x}$  pour  $p_1 = p_2 e^{-bx}$ ,

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = -p_2 b e^{-bx}.$$

Pour avoir la quantité de vapeur qui sort par la surface évaporante, il suffira de faire  $x = 0$ ,

$$\left(\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)_{x=0} = -p_2 b.$$

La quantité de vapeur émise par la surface  $s$  dans l'unité de temps sera :

$$M = -K \left(\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)_{x=0} \cdot s = K p_2 b \cdot s;$$

mais  $b = \sqrt{\frac{l}{s}}$ ,

$$M = K \cdot p_2 \cdot \sqrt{\frac{l}{s}} \cdot s;$$

ou encore

$$M = K p_s \sqrt{l \cdot s}.$$

Une surface a les dimensions du carré d'une longueur; on pourra donc énoncer ce résultat :

*Dans le cas d'une petite surface évaporante isolée, la masse de liquide évaporé dans l'unité de temps est proportionnelle au déficit de saturation et proportionnelle à la puissance 1,5 des dimensions linéaires de la surface.*

(Ou bien : elle est proportionnelle à la puissance 0,75 de l'aire de la surface).

### 5. Cas d'un cylindre évaporant.

Soient deux cylindres concentriques, de rayons respectifs :

$R_2$  sur lequel la pression de vapeur est  $p_2$ ;

$R_1$  sur lequel la pression de vapeur est  $p_1'$ .

L'équation à satisfaire est :

$$-\text{Div}(u, v, w) = K \left( \frac{1}{r} \frac{\partial p_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial r^2} \right).$$

Si on considère le *phénomène permanent*, l'équation devient :

$$\frac{dp_1}{dr} + r \frac{d^2 p_1}{dr^2} = 0,$$

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dp_1}{dr} \right) = 0;$$

d'où la solution

$$p_1 = A \log r + B.$$

Les surfaces isohygrobares sont des cylindres concentriques.

La masse de vapeur qui traverse une surface cylindrique de rayon  $r$  et de hauteur égale à l'unité, pendant l'unité de temps, est :

$$m = -2\pi r K \frac{\partial p_1}{\partial r} = -2\pi KA.$$

Elle est indépendante de  $r$ , comme il fallait s'y attendre a priori.

A et B se déterminent par les conditions aux limites :

$$\begin{array}{lll} p_1 = p_2 & \text{pour} & r = R_2, \\ p_1 = p_1' & \text{pour} & r = R_1; \end{array}$$

$$A = \frac{p_2 - p_1'}{\log R_2 - \log R_1} = \frac{p_2 - p_1'}{\log \frac{R_2}{R_1}},$$

$$B = \frac{p_1' \log R_2 - p_2 \log R_1}{\log R_2 - \log R_1} = \frac{p_1' \log R_2 - p_2 \log R_1}{\log \frac{R_2}{R_1}};$$

On a donc l'expression de  $p_1$  et celle de  $m$

$$m = \frac{2 \pi K (p_2 - p_1')}{\log \frac{R_2}{R_1}}.$$

## 6. Cas d'une sphère évaporante.

Considérons seulement le phénomène permanent; négligeons comme toujours l'action de la pesanteur. Soit une sphère évaporante de rayon  $R_2$ , la pression de la vapeur étant  $p_2$  à sa surface. Cette sphère est située à l'intérieur d'une enveloppe sphérique de rayon  $R_1$ , qui lui est concentrique, et sur la surface intérieure de laquelle la pression de la vapeur est constante et égale à  $p_1'$ .

Dans l'unité de temps, à travers une surface sphérique de rayon  $r$  (tel que :  $R_2 < r < R_1$ ), passe une quantité de vapeur

$$m = -4 \pi r^2 K \frac{dp_1}{dr},$$

d'où

$$m = 4 \pi K (p_2 - p_1') \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2};$$

$m$  ne dépend pas de  $r$ , comme cela est évident a priori.

*Cas d'une sphère évaporante placée dans une atmosphère illimitée.*

Si la sphère se trouve dans une atmosphère illimitée, tout se passe comme si le rayon de l'enveloppe sphérique extérieure augmentait indéfiniment. On fera  $R_1 = \infty$  dans la formule précédente, d'où

$$m = 4 \pi K (p_2 - p_1') R_2.$$

## D) Influences diverses modifiant l'évaporation.

## 1. Influence de la pesanteur.

Nous avons, dans tous les raisonnements précédents, négligé l'action de la pesanteur; elle tend à ralentir l'ascension des molécules de vapeur dans l'atmosphère.

On peut même considérer qu'étant donnés deux corps (également évaporants et absorbants) placés dans la même enceinte, à la même température, à des altitudes différentes, du liquide aura tendance à distiller du corps supérieur vers le corps inférieur. La difficulté dans des expériences de ce genre est de maintenir les deux corps rigoureusement à la même température. Si on suppose la tension de vapeur dans l'enceinte très voisine de la saturation, il est logique d'admettre que la vapeur émise par le liquide forme avec celui-ci un équilibre statistique, mais la pesanteur intervenant tendra à augmenter légèrement la concentration en vapeur à la partie inférieure de l'enceinte.

On peut citer à ce sujet les expériences de Plantefol<sup>(14)</sup> sur les Mousses : des Mousses imbibées d'eau, placées dans une cloche au-dessus d'un cristalliseur contenant de l'eau, et à une température maintenue constante à  $\frac{1}{10}$  de degré près, perdent une partie de leur poids<sup>(15)</sup>.

## 2. Influence de la capillarité.

Nous avons considéré le cas où la surface évaporante était plane, ou de grand rayon de courbure. Si la surface est courbe, les forces capillaires interviennent. On arrive à évaluer leur influence<sup>(16)</sup> en considérant un large vase contenant un liquide (de l'eau par exemple) dans lequel plonge un tube capillaire. Le tout est supposé enfermé dans une cloche dont on a retiré l'air. Le liquide par capillarité s'élève, dans le tube, à une certaine hauteur  $h$ , qui dépend : du rayon intérieur  $r$  du tube, de la densité du liquide  $\delta$ , de sa constante capillaire  $A$ , et de la densité  $\delta'$  de la vapeur

$$h = \frac{2A}{r(\delta - \delta')}g \quad (\text{Loi de Jurin.})$$

$g$  est l'accélération de la pesanteur.

14. PLANTEFOL (L.) : *Étude biologique de l'Hypnum triquetrum; Relations entre la morphologie, la physiologie et l'écologie d'une espèce végétale* (Ann. sc. nat. Bot., 1927).

15. Il s'agit bien d'évaporation et non de transpiration; Plantefol a trouvé sensiblement les mêmes résultats : avec les mousses vivantes et avec les mousses mortes, la perte de poids est la même.

16. Cf. BOUASSE, *Capillarité*.

D'après le principe fondamental de l'hydrostatique la pression de la vapeur au niveau de la surface du liquide du vase est supérieure à la pression au niveau du ménisque. Si la pression maximum était indépendante de la forme de la surface, il y aurait distillation continue de vapeur sortant du tube pour aller se condenser à la surface du liquide du vase; ce mouvement perpétuel est difficile à admettre. Il faut donc que la pression maximum dépende de la courbure de la surface : elle doit diminuer quand le rayon de courbure du ménisque diminue.

Si  $p_2$  est la pression maximum pour une surface plane,  $p_2'$  la pression maximum pour une surface de rayon  $r$  (on assimile le ménisque à une surface sphérique), on aura :

$$p_2 = p_2' + h\delta'g,$$

et en remplaçant  $h$  par sa valeur :

$$p_2' = p_2 - \frac{2A\delta'}{r(\delta - \delta')},$$

mais  $\delta'$  est très petit par rapport à  $\delta$ ; finalement

$$p_2' = p_2 - \frac{2A\delta'}{r\delta}.$$

Le terme correctif est faible, mais il n'est pas toujours négligeable<sup>(17)</sup>.

### 3. Influence des substances dissoutes.

Lorsqu'au lieu d'un liquide pur on a une solution soumise à l'évaporation, les lois établies peuvent être encore facilement appliquées si la vapeur émise est formée uniquement par le liquide pur.

Par exemple, si on a affaire à une solution dans l'eau de diverses substances non volatiles (ou peu volatiles dans les conditions de l'expérience), les résultats généraux sont encore valables, mais tout se passe comme si la tension de la vapeur d'eau émise par le liquide était diminuée. Considérons une solution qui ne soit pas très concentrée : d'après la loi de Raoult sur la tonométrie, la diminution relative de la pression maximum d'une solution étendue (et non électrolysable) est proportionnelle à la quantité de substance dissoute dans l'unité de volume et en raison inverse de

17. Il se pourrait que des actions analogues interviennent dans les expériences de Plantefol sur les mousses, déjà citées.

Dans le calcul nous avons supposé que la densité de la vapeur  $\delta'$  était constante dans tout l'espace extérieur au tube; on pourrait faire le calcul complet en tenant compte de sa variation. Ce calcul ne présente pas de difficulté ni d'intérêt particulier.

la masse moléculaire de la substance. La solution aqueuse renferme  $m$  grammes de corps dissous dans 100 grammes d'eau ;  $M$  est la masse moléculaire du corps dissous. Si  $p_s$  est la pression maximum de la vapeur d'eau pure,  $p_s'$  la pression maximum de la vapeur émise par la solution à la même température, la loi de Raoult s'exprime par la formule

$$\frac{p_s - p_s'}{p_s} = R \cdot \frac{m}{M}.$$

La constante  $R$ , pour l'eau, vaut  $\frac{18.5}{100}$ .

Pour les solutions dans l'eau<sup>(18)</sup> :

$$\frac{p_s - p_s'}{p_s} = \frac{18,5}{100} \frac{m}{M}.$$

On pourra appliquer les lois générales au cas d'une solution, à condition de considérer la tension maximum de la vapeur émise par la solution comme égale à la tension maximum de la vapeur d'eau pure à une température inférieure à celle de la solution. Cette température sera d'autant plus basse que la solution sera plus concentrée.

Si dans une atmosphère limitée, à température constante, se trouvent deux surfaces évaporantes, l'une d'un liquide pur, l'autre d'une solution dans ce liquide, il y aura distillation du liquide pur vers la solution.

Ce fait permet d'expliquer l'absorption d'eau par les parties aériennes des plantes, dans certains cas (voir Chapitre XI).

#### 4. Influence de l'agitation de l'air.

Historiquement, on a longtemps admis que la vitesse d'évaporation était proportionnelle à l'aire de la surface évaporante. Stefan<sup>(19)</sup> a montré que dans l'air

18. On peut remarquer que, dans le cas de l'eau, la constante tonométrique est 100 fois plus faible que la constante cryométrique. Par exemple si on a trouvé  $-1^{\circ},2$  comme point de congélation d'un suc de feuilles, on en déduit immédiatement que  $\frac{p_s - p_s'}{p_s} = 0,012$  pour le même liquide.

Ainsi dans ce cas, à  $25^{\circ}$ ,  $p_s = 23^{\text{mm}},55$  de mercure  $p_s' = 23,55 - 0,28 = 23^{\text{mm}},27$  ce qui équivaldrait à la tension maximum de l'eau pure à  $24^{\circ},8$ .

Ce raisonnement a l'avantage de s'appliquer même dans le cas des électrolytes, en admettant que la dissociation électrolytique a même influence sur l'abaissement de la tension de vapeur et sur l'abaissement du point de congélation.

19. STEFAN (J.), *Ueber die Verdampfung aus einem kreisförmig oder elliptisch begrenzten Becken* (Sitz. K. Akad. Wien, 1881).

Il faudrait que l'atmosphère soit *absolument* calme, ce qui n'est jamais réalisé. Cf. Jeffreys.

absolument calme la quantité de liquide évaporé devait être proportionnelle aux dimensions linéaires du récipient : la vapeur se dissipe dans l'atmosphère, dans des directions obliques, au voisinage des bords, et ne se répand pas seulement normalement à la surface. Il a étudié certains cas particuliers (cercle, ellipse).

Le problème de l'évaporation en atmosphère agitée est beaucoup plus complexe. Supposons le cas le plus simple : l'air circule parallèlement à une surface plane évaporante limitée. L'air qui arrive parallèlement à la surface s'enrichit peu à peu en vapeur à mesure qu'il progresse au-dessus de cette surface ; les masses d'air en contact avec le liquide deviennent de plus en plus humides : les dernières portions de la surface émettent moins de vapeur que les premières. Le problème a été traité théoriquement par Jeffreys<sup>(20)</sup> ; il a comparé ensuite ses résultats avec ceux de divers expérimentateurs. Une solution plus simple a été donnée par Treitel dans le travail de Walter<sup>(21)</sup> ; celui-ci a fait plusieurs expériences sur l'évaporation dans l'air en mouvement.

Pour la démonstration théorique, on suppose que l'air avance d'un mouvement uniforme parallèlement au plan de la surface évaporante. Dans ce cas l'hydrodynamique nous enseigne que tout se passe comme si l'air se déplaçait par couches planes parallèles au plan. La couche au contact immédiat du plan est sensiblement immobile ; les couches voisines ont des vitesses de plus en plus grandes jusqu'à la valeur de la vitesse d'ensemble de l'air. Il faut faire intervenir la viscosité.

Les résultats théoriques montrent que l'évaporation est proportionnelle à la puissance 1,5 des dimensions linéaires, pour des surfaces semblables, semblablement exposées au vent. En réalité, dans une atmosphère médiocrement agitée, les résultats expérimentaux montrent que la quantité d'eau évaporée est sensiblement proportionnelle à la puissance 1,7 des dimensions linéaires (c'est-à-dire à la puissance 0,85 de l'aire) de la surface évaporante, et cela même dans un air très peu agité.

Il faut des courants d'air très violents pour que l'on puisse considérer l'évaporation comme proportionnelle à la surface.

En conséquence, dans la nature on ne peut pratiquement jamais considérer l'air comme calme, et on ne peut jamais se contenter de tenir compte uniquement des dimensions linéaires ; de même la vitesse du vent n'est que très exceptionnellement suffisante pour qu'on puisse admettre la proportionnalité de l'évaporation à la surface.

Quant aux nombreuses formules où figure la vitesse du vent, qu'elles soient

20. JEFFREYS (H.), *Some problems of evaporation* (Phil. Mag., 1918).

21. WALTER (H.) : *Die Verdunstung von Wasser in bewegter Luft und ihre Abhängigkeit von der Grösse der Oberfläche. Zur Kritik der Transpirationsversuche. Mit einem Anhang von Otto Treitel* (Zeitschr. f. Bot., 1926).

théoriques ou empiriques, elles sont remarquables par leur variété<sup>(22)</sup>. Leur seul point commun est de faire figurer le déficit de saturation. Quant à la vitesse du vent, elle apparaît tantôt par sa racine carrée, tantôt par sa racine cubique, ou encore par sa puissance 1,5, et même dans l'exposant d'une fonction exponentielle.

Il est donc à peu près impossible actuellement de donner une formule simple et à laquelle on puisse se fier entièrement. Cependant il semble que l'on peut admettre la proportionnalité de la vitesse d'évaporation à la racine carrée de la vitesse du vent, comme se rapprochant le mieux des résultats expérimentaux pour les vitesses faibles et moyennes.

### 5. Influence de la proximité de plusieurs surfaces évaporantes.

a) Supposons d'abord une enceinte isotherme complètement fermée, et dans laquelle se trouve une surface évaporante. Il est évident que l'évaporation s'arrêtera dès que l'équilibre sera obtenu, c'est-à-dire dès que l'atmosphère sera saturée.

S'il y a plusieurs surfaces évaporantes dans l'enceinte, quelles que soient les orientations et les aires de ces surfaces, on aura encore le même résultat : l'évaporation s'arrêtera dès que la pression maximum correspondant à la température considérée sera atteinte. Nous négligeons l'action de la pesanteur.

Si l'enceinte n'est pas isotherme, il y aura état permanent quand la pression de la vapeur sera la tension maximum  $p_s$  correspondant à la surface la plus froide : il y aura alors distillation continue des surfaces plus chaudes vers la surface la plus froide (principe de la paroi froide).

b) Reprenons le cas d'une telle enceinte renfermant diverses surfaces évaporantes ; la pression maximum qui s'établit à l'intérieur est  $p_s$ . On crée dans la paroi de l'enceinte une petite ouverture de façon à mettre l'intérieur en relation avec l'atmosphère extérieure où la vapeur d'eau a une pression  $p_1$ , la surface de cette ouverture étant inférieure à la somme des aires des surfaces évaporantes intérieures. A cause de la lenteur de la diffusion, on pourra admettre que tout se passe comme s'il y avait seulement, pour surface évaporante, la petite ouverture pratiquée dans la paroi, émettant de la vapeur sous la pression  $p_s$ . (C'est un phénomène analogue qui se produit dans le cas d'un stomate : la chambre sous-stomatique correspondrait à l'enceinte précédente, dont la paroi intérieure serait évaporante.)

Le raisonnement précédent ne serait pas admissible si l'aire de l'ouverture dans la paroi était notablement plus grande que la somme des aires des surfaces évaporantes intérieures.

---

22. Voir des exemples dans : HANN (J. VON), *Lehrbuch der Meteorologie*; ou dans : LINKE, *Meteorologisches Taschenbuch*.

*c) Généralisation.*

Supposons un grand nombre de surfaces évaporantes très voisines les unes des autres, et ayant même déficit de saturation par rapport à l'atmosphère. Si l'atmosphère n'est pas extrêmement agitée, on pourra théoriquement remplacer, au point de vue de l'évaporation, l'ensemble par une seule surface fictive, qui contiendrait, avec une aire minimum, toutes les surfaces données, et présenterait par rapport à l'atmosphère le même déficit de saturation.

Les évaluations de transpiration que l'on donne généralement comme exemples dans les livres classiques sont donc considérablement exagérées. En effet, pour évaluer par exemple la quantité d'eau transpirée par un arbre, on part de la quantité transpirée par une feuille de dimensions moyennes (ou par un petit rameau) et on fait une règle de trois en se basant sur le nombre de feuilles approximatif de l'arbre. On obtient ainsi des résultats excessifs, d'autant plus exagérés que l'arbre est plus touffu.

J'ai donc, comme je me l'étais proposé, examiné dans ce chapitre l'évaporation du point de vue théorique. J'ai aussi considéré les influences susceptibles de la modifier, en envisageant surtout celles qui interviendront dans le cas de la transpiration des plantes. Nous voilà maintenant armés par la connaissance physique des phénomènes pour essayer une application à la biologie.

---

## CHAPITRE V

### La transpiration chez les plantes dans ses rapports avec l'évaporation. Historique sommaire et étude générale.

---

#### 1. Remarque préliminaire.

Lorsqu'on se propose d'établir la bibliographie d'une question, on peut envisager deux méthodes : soit chercher à être le plus complet possible, soit ne citer que l'indispensable.

La première de ces méthodes m'avait conduit à une liste d'une ampleur considérable. J'ai pensé que ces énumérations longues et fastidieuses seraient sans intérêt pour le lecteur; d'autant plus que les mémoires ainsi cités n'ont souvent que des relations indirectes avec la question étudiée. Je m'efforcerai donc d'être aussi bref que possible et de me limiter aux références essentielles. Il me paraît utile d'indiquer rapidement l'état actuel de la question et de rappeler les principaux chercheurs qui l'ont abordée.

#### 2. L'influence du milieu.

L'action du milieu extérieur sur les végétaux a fait l'objet de nombreuses études; un grand nombre de documents ont été ainsi rassemblés<sup>(1)</sup>. Dans une première période, on se contentait de simples observations sur l'action du milieu. Linné avait déjà noté que l'altitude peut provoquer le nanisme. Ensuite, de nombreuses observations s'accumulèrent<sup>(2)</sup>, mais la complexité du milieu ne permettait pas d'en tirer des conclusions précises.

L'influence des différents agents du milieu extérieur ne pouvait être nettement déterminée que par des expériences : une nouvelle période, celle de la morphologie expérimentale, débutait.

De 1876 à 1889, Mer<sup>(3)</sup> étudie l'action du milieu aquatique et de la lumière.

---

1. Cf. COMBES (R.), *Histoire de la biologie végétale en France* (Paris, 1933).

2. Cf. CHATIN (A.), *Anatomie comparée des végétaux* (1856).

3. MER (E.) : *De la végétation à l'air des plantes aquatiques* (C. R. Ac. Sc., 1882); *Des modifications subies par la structure épidermique des feuilles sous diverses influences* (C. R. Ac. Sc., 1882).

En 1881, Vesque<sup>(4)</sup> fait des expériences sur l'influence de la lumière et sur celle de l'état hygrométrique de l'air. En 1883<sup>(5)</sup> Stahl étudie l'influence de la lumière. En 1884, Costantin<sup>(6)</sup> précise l'influence du milieu aquatique.

La même année Bonnier<sup>(7)</sup> commence la série de ses cultures comparatives à des altitudes diverses; puis il entreprend des cultures comparatives pour étudier l'influence des alternances de température, et celle de la continuité de l'éclaircissement.

Depuis les recherches se sont multipliées dans la voie de la morphologie expérimentale.

Comme essai d'étude complète du milieu, aussi complète que le permet l'état actuel de nos connaissances, il faut citer entre autres les travaux de Clements<sup>(8)</sup>, qui s'est attaché d'abord à une analyse du milieu, qualitative et quantitative, mesurant l'intensité des différents facteurs qu'il avait mis en évidence. Ensuite il a tenté la synthèse de ce milieu: des plantes enracinées étaient enfermées dans des récipients et disposées par séries dans les milieux à étudier; au bout d'un temps suffisant les différentes parties des plantes ainsi traitées étaient mesurées et comparées (Clements et Goldsmith)<sup>(9)</sup>. De nombreux chercheurs ont fait des essais de ce genre: Lundegårdh, Hagène, etc.

### 3. Définition de la transpiration et principales méthodes d'étude<sup>(10)</sup>.

La transpiration consiste dans l'émission de vapeur d'eau; elle se produit dans tous les organes de la plante en contact avec l'atmosphère.

Parmi tous les composés minéraux qui interviennent dans la vie de la plante, l'eau joue un rôle fondamental: elle existe dans toutes les cellules, elle est indispensable à tous les phénomènes vitaux. La plupart des réactions chimiques intracellulaires ne peuvent s'effectuer qu'entre des corps réagissants dissous; l'eau permet le transport d'un point à un autre de tous les constituants solubles de l'organisme végétal.

4. VESQUE (J.), *Sur les causes et les limites des variations de structure des végétaux* (Ann. agron., 1883).

5. STAHL (J.), *Ueber den Einfluss des sonnigen oder schattigen Standortes auf die Ausbildung der Laubblätter* (Jen. Zeits. f. Naturw., 1883).

6. COSTANTIN (J.): *Recherches sur la structure de la tige des plantes aquatiques* (Ann. Sc. nat., Bot., 1884); *Études sur les feuilles des plantes aquatiques* (Ann. Sc. nat., 1886).

7. BONNIER (G.), *Cultures expérimentales dans les Alpes et les Pyrénées* (Rev. gén. Bot., 1892); *Les plantes arctiques comparées aux mêmes espèces des Alpes et des Pyrénées* (Rev. gén. Bot., 1894); *Adaptation des plantes au milieu alpin* (Ann. Sc. nat., 1894); *Recherches expérimentales sur l'adaptation des plantes au climat alpin* (Ann. Sc. nat., Bot., 1895).

8. CLEMENTS (F.-E.), *Research methods in Ecology* (Lincoln, 1905).

9. CLEMENTS (F.-E.) et GOLDSMITH (G.-W.), *The phytometer method in Ecology* (Carn. Inst. Wash., Washington, 1924).

10. Cf. les traités classiques de biologie végétale, et SEYBOLD (A.), *Die pflanzliche Transpiration. I, II* (Erg. d. biol. Ges., 1929-1930).

Dans sa vie active, la plante doit absorber de l'eau pour introduire dans son organisme les substances minérales indispensables à sa croissance. Les échanges gazeux de la respiration et de l'assimilation chlorophyllienne ne peuvent avoir lieu que par les parois cellulaires; celles-ci ne sont perméables que si elles sont humides: en même temps que se produisent les échanges gazeux, il y a aussi perte de vapeur d'eau.

La constatation de la transpiration et la mesure de son intensité peuvent être faites à l'aide de trois méthodes, dont le principe est déjà ancien.

*Méthode de Mariotte<sup>(11)</sup> et de Guettard<sup>(12)</sup>.*

La plante est enracinée dans la terre humide d'un pot. Celui-ci est vernissé et couvert d'un disque de métal ménageant le passage de la tige de la plante; ou bien le pot est enfermé dans une boîte métallique hermétique ne laissant que le passage de la tige.

(Le pot, et la terre qu'il contient, ne peuvent émettre de vapeur; on le contrôle facilement en remplaçant la tige de la plante par un agitateur de verre de même diamètre: la boîte, garnie de son pot, conserve une masse constante.)

La plante étant placée sous une cloche, on recueille l'eau condensée; on peut peser celle-ci directement.

Comme variante: on met sous la cloche une substance très avide de vapeur d'eau: l'augmentation de masse de cette substance donne la masse de l'eau dégagée. Il faut que la substance absorbante soit en assez grande quantité.

On peut aussi n'enfermer qu'une partie de la plante (feuille, rameau) dans un tube de verre de dimensions convenables.

Cette méthode a l'inconvénient de fournir des nombres trop élevés, surtout si l'ensemble est exposé au soleil, la température de la plante s'élevant beaucoup plus que celle des parois de verre.

*Méthode de Hales<sup>(13)</sup>.*

La boîte, établie comme précédemment, est chargée de son pot garni de la plante. Des pesées à divers intervalles permettent d'évaluer à peu de chose près la quantité d'eau transpirée (on néglige ainsi la résultante des échanges gazeux qui entraînent une faible variation de masse).

Une variante de cette méthode a été imaginée par Huber<sup>(14)</sup> et perfectionnée par

11. MARIOTTE, *Essais de physique* (1679).

12. GUETTARD, *Mém. Acad. Sc.*, Paris, 1748.

13. HALES, *Statical Essays* (1724).

14. HUBER (Br.), *Zur Methodik der Transpirationsbestimmung am Standort* (Ber. d. deutsch. bot. Ges., 1927).

Stocker<sup>(15)</sup> : il est souvent impossible d'opérer sur des plantes entières, à cause de leurs dimensions; on effectue alors la mesure sur des organes coupés (rameaux, feuilles). On opère très rapidement les pesées sur place avec des balances de précision transportables : on pèse l'organe aussitôt qu'il est coupé, puis on le replace sur la plante à peu près dans sa position primitive. Après un temps déterminé, par exemple trois minutes, on le pèse à nouveau.

Cette technique a été utilisée entre autres par Killian<sup>(16)</sup> dans ses études sur la transpiration des végétaux du climat méditerranéen, et par Giroux<sup>(17)</sup> dans ses recherches sur les Ericacées languedociennes.

#### *Méthode du potomètre.*

Cette méthode, indiquée également par Hales, permet de comparer l'eau transpirée à l'eau absorbée.

Elle a été appliquée à des organes détachés de la plante. La partie à étudier est ajustée par un bouchon dans une branche d'un tube en U dont l'autre branche est très étroite. L'appareil est rempli d'eau; le déplacement du niveau dans la branche étroite permettra de voir le volume d'eau absorbée, assez peu différent de celui de l'eau transpirée.

L'évaporation par la surface libre de la petite branche est négligeable : en abandonnant un dispositif analogue, mais sans le fragment de plante, le ménisque ne se déplace pas.

Le fait de sectionner un rameau ou une feuille et de l'alimenter par de l'eau pure modifie les conditions; par exemple la portion de plante voit son suc cellulaire diminuer de concentration. La transpiration d'une feuille séparée de la plante est beaucoup plus abondante que celle d'une feuille de surface égale, encore fixée à la plante.

La méthode est applicable à des plantes entières<sup>(18)</sup> qu'on a fait se développer en milieu liquide; l'appareil est rempli du liquide de culture. Ici encore la plante se trouve dans des conditions de culture anormales.

#### *Remarque.*

Les expérimentateurs avaient bien observé le fait qu'une feuille séparée transpire proportionnellement davantage qu'une feuille encore sur la tige, mais ils l'avaient

15. STOCKER (O.), *Eine Feldmethode zur Bestimmung der momentanen Transpirations- und Evaporationsgrösse* (Ber. d. deutsch. bot. Ges., 1929).

16. KILLIAN (Ch.), *Recherches écologiques sur les fluctuations saisonnières de la transpiration chez les végétaux du climat méditerranéen* (Bull. soc. bot. France, 1931).

17. GIROUX (J.), *Recherches biologiques sur les Ericacées languedociennes* (Thèse, Paris, 1936).

18. SACHS, *Physiologie végétale* (1868).

interprété de façon inexacte, disant par exemple que « les choses se passent comme si la feuille, affaiblie par son isolement, laissait échapper plus facilement l'eau qu'elle renferme ». J'ai déjà fait remarquer que l'eau dans laquelle on fait plonger le pétiole permet plus facilement la dilution du suc cellulaire dans le cas de la feuille isolée. D'autre part, l'ensemble des feuilles rapprochées émettant simultanément de la vapeur, l'air avoisinant est relativement moins sec que dans le cas d'une seule feuille. On peut à propos de l'influence mutuelle des surfaces évaporantes rapprochées, influence qui a pour résultat de diminuer considérablement la quantité d'eau évaporée, remarquer que la plupart des évaluations de la quantité d'eau transpirée sont fortement exagérées ; les auteurs, ayant mesuré la transpiration pour une feuille ou un rameau, calculent par une simple règle de proportionnalité ce qu'un champ ou un arbre émettraient si l'intensité de la transpiration était la même que pour la feuille ou le rameau isolés<sup>(19)</sup>.

#### 4. Les facteurs qui agissent sur la transpiration.

a) La transpiration est sous la dépendance de plusieurs facteurs.

Ce phénomène physiologique se rapproche par certains côtés du phénomène physique de l'évaporation : l'élévation de la température, la sécheresse de l'air et son agitation augmentent la transpiration.

Plus la *température* est élevée, plus la transpiration est intense<sup>(20)</sup>. Aux hautes températures, la transpiration ne diminue que si les feuilles commencent à se dessécher.

La température du végétal est d'ordinaire peu différente de celle du milieu extérieur, car, d'une part les oxydations sont relativement faibles, d'autre part les surfaces de contact entre les végétaux supérieurs et le milieu sont considérables et permettent la dispersion rapide de la chaleur due au phénomène respiratoire. La chaleur végétale peut devenir importante dans certains cas (germination, floraison).

La température de l'air dépend du rayonnement solaire, de la nature du sol, et de la végétation. Elle n'est pas uniforme ; en général elle est plus élevée à la surface du sol : les formes basses de plantes subissent un climat plus chaud pendant toute la journée, donc tendent à transpirer davantage.

Cette différence de température entre le sol, les plantes et l'air, est particu-

19. Voir plus haut (chap. IV, D, § 5).

20. VESQUE, *De l'absorption de l'eau dans ses rapports avec la transpiration* (Ann. Sc. nat., 1877).

La transpiration est déjà sensible aux basses températures, par exemple à  $-20^{\circ}$  pour l'If. Elle croît d'abord lentement jusque vers  $15^{\circ}$ , plus rapidement jusque vers  $30^{\circ}$  ; elle passe par un maximum à une température qui varie avec les plantes ; elle diminue dès que la plante commence à souffrir.

lièrement sensible à haute altitude<sup>(21)</sup>. Les touffes de plantes, en montagne, sont fréquemment à une température notablement supérieure à celle de l'air.

La température du sol agit directement sur la plante en réglant l'absorption de l'eau; pour la plupart des espèces, la vitesse d'absorption diminue rapidement quand la température s'abaisse.

La plus ou moins grande *humidité de l'air* agit sur la transpiration. La transpiration s'affaiblit à mesure que l'état hygrométrique de l'air s'élève; elle s'arrêterait dans une atmosphère saturée. Dans l'obscurité et en atmosphère saturée, la plante ne transpire pas; sous l'action de la lumière la plante transpire même en milieu saturé en apparence: cela s'explique par une température de la plante supérieure à celle du milieu ambiant.

En un lieu donné le déficit hygrométrique augmente en général par temps ensoleillé et diminue par temps couvert; il s'annule par temps de pluie.

L'état hygrométrique de l'air intervient pour limiter les aires des espèces<sup>(22)</sup>. Par exemple *Picea excelsa* dans le Nord et l'Est de l'Europe ne dépasse pas la limite de 10<sup>mm</sup> pour le déficit de saturation. Inversement l'état hygrométrique de l'air est sous la dépendance de la nature du sol et de la végétation<sup>(23)</sup>.

*L'agitation de l'air* augmente la transpiration<sup>(24)</sup>. Des plantes en pots, soumises à un vent de vitesse constante et connue, comparées à des plantes témoins, montrent une réduction des dimensions, une diminution de la surface foliaire, une augmentation de la transpiration et du rapport de l'eau transpirée au poids sec (Martin et Clements, 1935; Wrenger, 1935). Sur l'évaporation physique, le vent intervient pour l'augmenter; l'évaporation, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnelle à la racine carrée de la vitesse du vent. Sur les plantes, l'action de l'agitation de

21. CHOUARD (P.), *Premières observations sur les microclimats de montagne autour du laboratoire d'Orédon et sur leur importance écologique* (Congr. soc. sav., 1933).

DEVAUX (H.), *L'échauffement de la surface du sol par le rayonnement solaire au sommet du Pic du Midi et dans les plaines tempérées ou tropicales* (Bagnères, 1938).

NÉTIEN (G.) et QUANTIN (A.), *Température des touffes de quelques plantes alpines et variations diurnes de celle-ci* (Bull. Soc. lin., Lyon, 1938). ♦

22. Voir GAUSSEN (H.), *Géographie des Plantes* (Paris, 1933).

23. Hagène en particulier a montré la grande importance de la végétation. Il a notamment effectué des séries de mesures au-dessus des pelouses et dans des bois; il a souvent constaté des variations très grandes, au-dessus des pelouses et, sous bois, des facteurs d'évaporation bien inférieurs.

Voir: HAGÈNE (P.), *Recherches écologiques sur quelques groupements végétaux des environs de Dijon* (Rev. gén. Bot., 1931); Articles parus dans l'Encyclopédie Française, t. V (*Les facteurs de la végétation*).

24. BOUSSINGAULT, *Étude sur les fonctions physiques des feuilles* (Ann. de Ch. et de Phys., 1873).

l'air (si elle n'est pas trop forte) se réduit au brassage de l'air au voisinage de l'épiderme, à l'enlèvement de la vapeur d'eau qui sort par les stomates (on sait que pour les feuilles âgées, la transpiration cuticulaire est négligeable). Or la surface évaporante des plantes vasculaires est constituée par les membranes qui limitent les lacunes et les méats intercellulaires. L'influence du vent sur la transpiration semble devoir être plus faible que son influence sur la simple évaporation. Si le vent est fort, s'il agite les tiges et les feuilles, il les déforme d'une manière discontinue et irrégulière; il y a alors expulsion mécanique d'une partie des gaz contenus dans les espaces intercellulaires; la transpiration doit être accélérée, mais on ne peut déterminer d'une façon précise dans quelles proportions<sup>(25)</sup>.

L'influence du vent sur la transpiration, dans les conditions habituelles, est relativement moins grande que celle de l'humidité de l'air. L'action du vent est variable suivant sa provenance qui conditionne sa teneur en vapeur d'eau. Sauf pendant la pluie, le vent élève toujours la transpiration : il brasse l'air entourant la plante et chargé d'humidité provenant de celle-ci, et il le remplace par de l'air plus sec. On explique ainsi la grande utilité des écrans, formés par exemple par des rideaux d'arbres, dans les régions de vents secs, pour ralentir la transpiration des autres végétaux. L'action desséchante du vent est surtout néfaste en hiver et au printemps; le sol étant gelé ou très froid, l'absorption d'eau est nulle ou très lente, et la végétation ne peut compenser les pertes d'eau résultant de la transpiration. Cela explique, en partie, les formes rabougries de la végétation dans les régions à hiver rigoureux, où toute partie du végétal qui dépasse la couche de neige en hiver subit la dessiccation; de même l'action du vent permet d'expliquer en partie les formes prises en montagne, car le vent y est souvent très violent.

L'altitude intervient d'une manière indirecte, d'une part par abaissement de la température de l'air, d'autre part par de plus fortes variations nyctémérales de la température du sol : l'absorption atmosphérique étant plus faible, la température de la surface du sol peut s'élever beaucoup plus dans le jour, mais le rayonnement nocturne est aussi beaucoup plus grand<sup>(26)</sup>.

L'altitude agit indirectement par la lumière plus intense (surtout pour le violet et l'ultra-violet) à mesure qu'on s'élève; d'autre part il y a beaucoup moins de lumière diffuse que dans la plaine. On peut donc noter la grande importance possible du facteur lumière comme facteur secondaire de l'altitude, pour augmenter l'effet de la sécheresse.

---

25. SZYMKIEWICZ (D.), *Sur l'importance du déficit hygrométrique pour la phytogéographie écologique* (Act. soc. bot. pol., 1923).

26. HANN (J. VON), *Lehrbuch der Meteorologie* [4<sup>e</sup> éd. revue par Süring (R.), 1926].

SCHRÖTER (C.), *Das Pflanzenleben der Alpen* (2<sup>e</sup> éd., Zurich, 1923).

BROCKMANN-JEROSCH (H.), *Die Vegetation der Schweiz*, 2<sup>e</sup> brochure, Berne (1927).

La lumière, en effet, a une influence considérable, souvent bien plus importante que les autres facteurs, puisqu'une plante au soleil transpire 5 à 10 fois plus qu'à l'ombre ou à l'obscurité<sup>(27)</sup> (Boussingault, Wiesner). L'action de la lumière sur la transpiration est particulièrement marquée pour les parties vertes des plantes: elle est beaucoup plus faible sur les parties dépourvues de chlorophylle. On avait remarqué depuis longtemps que la transpiration des feuilles, très active pendant le jour, cesse presque complètement la nuit. Les premières mesures furent faites par Guettard<sup>(28)</sup> sur des branches de Douce-amère de mêmes dimensions, encore fixées à la plante, et introduites dans des ballons: une en plein soleil, la deuxième à la lumière diffuse, la troisième à l'obscurité. Au bout de quelques jours, la pesée de l'eau condensée dans ces ballons montrait que la branche à la lumière diffuse avait émis deux fois moins d'eau que celle en plein soleil; la branche à l'obscurité n'avait émis que le sixième de celle en plein soleil. Mais cet auteur avait négligé l'existence de différences de température entre les ballons; les expériences de Dehérain<sup>(29)</sup> et de Wiesner<sup>(30)</sup> en ont tenu compte, et ont fourni des résultats analogues. Les comparaisons entre des plantes analogues, les unes vertes, les autres étiolées, ont montré l'influence considérable de la présence de chlorophylle (expériences de Wiesner sur le Maïs). Pour ce qui est de la nature des radiations agissantes, ce sont surtout les radiations bleues et violettes qui ont l'action la plus énergique, ce qui met en évidence une action de la chlorophylle différente de l'assimilation (expériences par la méthode du spectre ou des écrans absorbants). Dans les parties dépourvues de chlorophylle, la lumière, incapable de produire l'assimilation, accélère notablement la transpiration, mais moins que pour les parties vertes.

Il semble aussi que la lumière ait une action indirecte, en élevant la température de la plante par simple absorption des radiations, par accélération des phénomènes respiratoires, par augmentation de la perméabilité des membranes.

La présence, dans les tissus périphériques, d'hétérosides colorés, modifie la quantité et les proportions relatives des diverses radiations qui arrivent au contact des cellules internes, et intervient en particulier sur la transpiration<sup>(31)</sup>.

Botticher et Behling<sup>(32)</sup>, en étudiant l'action de la lumière sur la structure foliaire, ont rapporté l'épaississement des feuilles dans les photomorphoses à l'accroissement de l'afflux de sels, non seulement par action directe de la lumière, mais aussi sous l'influence de la transpiration.

27. BOUSSINGAULT, *Étude sur les fonctions physiques des feuilles* (Ann. Chim. Phys., 1873).

28. GUETTARD (Mém. Ac. Sc., Paris, 1747).

29. DEHÉRAIN, *Sur l'évaporation de l'eau par les feuilles* (Ann. Sc. nat., 1869).

30. WIESNER (Sitz. der k. Akad., Wien, 1876); *Recherches de l'influence de la lumière et de la chaleur rayonnante sur la transpiration des plantes* (Ann. Sc. nat., 1877).

31. STAHL (E.), (Ann. Jard. bot. Buitenzorg, 1896).

32. BOTTICHER (R.) et BEHLING (L.), (Flora, 1939).

Lorsque les sucres végétaux renferment de grandes quantités de *substances dissoutes*, la transpiration est ralentie; cela s'explique par la diminution de tension de vapeur des solutions lorsque la concentration augmente; par exemple, la présence des acides chez les Cactus ralentit la transpiration<sup>(33)</sup> (Aubert). La présence de tannins accumulés pendant l'hiver dans les tissus de certaines espèces vivaces contribue à ralentir la transpiration au cours de la période de repos hivernal<sup>(34)</sup> (Warming).

La *dispersion plus ou moins grande des plantes* influe sur l'évaporation, par exemple dans le cas du Blé ou de l'Avoine (F. Chodat): si les plantes sont rapprochées elles transpirent moins; la réduction est plus forte pour les espèces à feuilles horizontales que pour les espèces à feuilles verticales. Le coefficient de transpiration (rapport de la transpiration dans le groupement à la transpiration hors du groupement) dépend des facteurs que nous avons déjà indiqués (vitesse et humidité de l'air, température, etc.).

Les plantes en coussinets, éclaircies par section de la moitié ou des trois quarts des tiges transpirent autant, et parfois davantage, qu'avant cette opération (Filzer).

b) La transpiration peut être modifiée par d'autres *mécanismes* que ceux qui régissent le phénomène physique d'évaporation, par exemple par les conditions modifiant la perméabilité des membranes. Ainsi le Gui, en hiver, transpire très peu; en été, il transpire beaucoup plus que le bouleau qui le porte (Härtel).

Nous allons d'abord étudier les causes qui agissent sur la transpiration des feuilles d'une même Plante: la transpiration n'est pas la même pour toutes ces feuilles.

L'intensité de la transpiration d'une feuille dépend de l'*âge* de cette feuille<sup>(35)</sup>: toutes choses égales d'ailleurs, les feuilles jeunes transpirent plus que les feuilles âgées. Haberlandt a fait ses mesures sur des pieds de céréales d'âges différents; Dehérain mesurait la transpiration de feuilles prises sur une même tige, à des hauteurs différentes, et semblablement exposées à la lumière solaire: il se peut qu'il y ait dans ce cas superposition d'une autre action dont nous parlerons un peu plus loin.

Il semble d'ailleurs<sup>(36)</sup> (von Höhnelt, 1878; Vesque) qu'il y ait un premier maxi-

33. AUBERT, *Recherches sur l'assimilation et la respiration des plantes grasses* (Ann. Sc. nat., Bot., 1892).

34. WARMING (Bot. Zentr., 1883).

35. HABERLANDT, *Ueber die Grösse der Transpiration unserer Kulturpflanzen* (Wiss. prakt. Unters. auf dem Gebiete des Pflanzenbaues).

DEHÉRAIN, *loc. cit.*

36. VESQUE (J.), *Sur les causes et les limites des variations de structure des végétaux* (Ann. agron., 1883).

mum de transpiration pour les feuilles jeunes, et un second maximum pour les feuilles complètement développées, ce dernier étant inférieur au premier. La cuticule joue un rôle actif dans la transpiration quand elle est très mince : c'est le cas des feuilles jeunes (et aussi des feuilles développées à l'ombre); l'eau qui imbibe les membranes cellulaires peut, au niveau des épidermes, traverser la cuticule qui limite ceux-ci. En vieillissant, la feuille épaisit sa cuticule, dont la perméabilité diminue puis s'annule. Mais, les stomates se développant peu à peu, la transpiration stomataire vient remplacer jusqu'à un certain point la transpiration cuticulaire. L'eau des cellules internes de la plante sature de vapeur les espaces aërières, les stomates, et peut de là passer dans l'atmosphère. Les épidermes à cuticule épaisse laissent passer les gaz et la vapeur d'eau à peu près uniquement par leurs ouvertures stomatiques; la dimension des ostioles est toujours faible : elle ne dépasse guère  $\frac{1}{100}$  de la surface foliaire quand les stomates fonctionnent à pleine ouverture.

Pour une feuille donnée, dans les mêmes conditions, la transpiration est généralement plus forte par la face inférieure que par la face supérieure, en raison du nombre habituellement plus grand des stomates sur la face inférieure : les stomates peuvent même faire défaut complètement sur la face supérieure.

La hauteur de l'insertion des feuilles sur la plante a une grande importance en ce qui concerne la structure de la feuille et la transpiration.

Huber<sup>(37)</sup> a étudié la transpiration des feuilles de grands arbres à diverses hauteurs. Il a trouvé pour les essences d'ombre (*Sequoia*, *Tilia platyphylla*, *Epicea*, *Hêtre*...) que la transpiration des feuilles diminue à mesure qu'on s'élève : la transpiration semble limitée ici par l'adduction d'eau qui devient plus difficile. Pour les essences de lumière (*Quercus sessilis*, *Mélèze*, *Pin*...) on observe souvent d'abord une augmentation de la transpiration à mesure qu'on s'élève sur l'arbre; l'action de la lumière semble compenser la difficulté de l'apport de l'eau.

L'influence, sur la structure de la feuille, de sa hauteur d'insertion avait déjà été publiée par Salensky<sup>(38)</sup> (1904) mais ses résultats ont été longtemps ignorés à

37. HUBER (B.). *Weitere Beobachtungen über verschiedene Dürresistenz bei Licht- und Schattenpflanzen* (Ber. d.d. bot. Ges., 1925).

Voir ASHBY, *Étude sur la transpiration des feuilles à l'ombre et à la lumière* (Bull. Soc. Bot., Genève, 1931).

38. Cf. MAXIMOV (N.-A.), *Les bases physiologiques de la résistance à la sécheresse des plantes* (en russe, Léningrad, 1926), (résumé en anglais), (analyse sommaire par Waller, in *Zeitschr. f. Bot.*, 1926).

L'ouvrage de Maximov est capital pour l'étude des échanges d'eau dans la plante. Il fournit une documentation considérable sur les travaux des auteurs russes. On trouve également des références dans :

MAXIMOV (N.-A.) : *The plant in relation to water* (London, 1929); *Plant physiology* (2<sup>e</sup> éd., Sd., trad. de la 5<sup>e</sup> éd. russe).

l'étranger. Il était arrivé à montrer par des mesures que plus une feuille est insérée haut sur la plante, plus grands sont, par unité de surface de la feuille : la densité de la nervation, le nombre des stomates, le nombre des poils et des cellules épidermiques ; au contraire les dimensions des ostioles, des poils, des cellules de l'épiderme et du mésophylle sont réduites ; la cuticule est épaissie, les parois des cellules épidermiques sont moins sinueuses. Pour les feuilles insérées plus haut le parenchyme en palissade et les tissus de soutien sont plus développés ; le parenchyme lacuneux et les méats sont moins développés.

La comparaison avec les plantes de stations sèches et de stations humides montre que les feuilles insérées plus haut ont tendance au xéromorphisme. Comme différences physiologiques, les feuilles insérées plus haut transpirent davantage ; leur suc cellulaire est plus concentré.

Ayant examiné les différences de transpiration pour les feuilles d'une même plante, il nous reste à étudier la transpiration selon les espèces.

L'intensité de la transpiration, dans les mêmes circonstances, est variable suivant l'espèce végétale étudiée. C'est ce qui résulte de nombreuses expériences anciennes ou modernes. On a trouvé des différences notables pour des plantes de la même famille. En rapportant la quantité d'eau transpirée à des surfaces ou à des volumes égaux, on trouve en général que les graminées transpirent fortement, plus que les autres plantes herbacées ; la transpiration est moindre pour les arbres à feuilles caduques ; elle est très faible pour les plantes à feuilles persistantes ou charnues.

On peut dire en général que les plantes inférieures (Champignons, Mousses) évaporant par leur surface extérieure, la transpiration s'effectue sensiblement comme l'évaporation physique, comme se ferait (à un facteur près) l'évaporation d'un évaporimètre. Dans le cas des plantes supérieures (Phanérogames), il peut y avoir deux modes de transpiration en général : transpiration cuticulaire et transpiration stomataire. Sauf chez les feuilles très jeunes, c'est la transpiration stomataire qui est la plus importante. Le nombre et la répartition des stomates étant déterminés pour une feuille donnée (dans des conditions définies), on pourra admettre que la transpiration stomataire est toujours sensiblement proportionnelle à la surface de la feuille. Il n'en serait pas de même de la transpiration cuticulaire qui est proportionnelle à la puissance 0,85 de la surface de la feuille comme nous l'avons vu chap. iv (et non pas aux dimensions linéaires de la feuille, comme le ferait croire la démonstration théorique de Stefan, valable seulement pour un air infiniment calme, condition jamais réalisée).

#### c) Variations journalières de la transpiration.

La transpiration, comme nous l'avons vu, est conditionnée par l'état hygrométrique de l'air comme facteur principal ; la température, le vent, la lumière agissent aussi.

Ces facteurs présentent des variations journalières qui entraînent une certaine régularité d'allure dans la marche de la transpiration. Cette marche journalière est la suivante : en moyenne nulle ou très faible le matin, elle augmente assez rapidement, passe par un maximum vers 14 heures, décroît assez lentement jusque vers 18 heures et redevient très faible et presque nulle avant le milieu de la nuit. En réalité les phénomènes météorologiques varient irrégulièrement et provoquent des écarts de la transpiration par rapport à l'allure moyenne.

*d) Utilité relative de la transpiration.*

Leclerc du Sablon<sup>(39)</sup> a particulièrement insisté sur le fait que la transpiration, utile à la plante dans certains cas, peut n'être pas indispensable. La transpiration semble intervenir dans les mouvements de migration des substances : elle produit une aspiration qui contribue à la circulation de la sève et assure la turgescence cellulaire.

L'absorption de chaleur due à l'évaporation tendrait à diminuer la température de l'organe. Cet effet semble de peu d'importance : c'est dans les pays chauds et secs que les plantes transpirent le moins en général. La végétation luxuriante des serres, où l'atmosphère est toujours très humide, et celle de certaines forêts tropicales montrent que la transpiration n'est pas une fonction essentielle pour la nutrition de la plante. Même dans le cas de turgescence maximum sans transpiration, les sels solubles utiles à la plante peuvent circuler ; par suite des réactions vitales, ils entrent dans des combinaisons organiques solides ou colloïdales. Ce déplacement de l'équilibre se traduit par l'absorption d'une nouvelle quantité de ces sels du sol. En définitive les sels utiles sont absorbés même s'il n'y a pas transpiration ; quant aux sels inutiles à la plante, ils cessent d'y pénétrer dès que leur pression osmotique est la même à l'intérieur qu'à l'extérieur.

La transpiration accélérera un peu la pénétration des sels ; son influence sur les sels utiles est faible, mais la vitesse d'entrée des sels inutiles dans la plante est fortement accélérée. La transpiration contribue à la circulation de la sève, mais elle ne suffit pas, à elle seule, à expliquer le mouvement ascendant de la sève, surtout dans le cas des grands arbres.

Le rôle essentiel des stomates n'est pas de favoriser la transpiration, mais de faciliter les échanges gazeux de la respiration et surtout de l'assimilation. Les plantes xérophiles conservent leurs stomates, mais ceux-ci sont disposés pour éviter le plus possible la sortie de la vapeur d'eau. Le nombre des stomates dépend de la

---

39. LECLERC DU SABLON : *Sur la signification du dégagement de vapeur d'eau par les plantes* (Rev. gén. Bot., 1909, 1913) ; *Sur le mécanisme de la circulation de l'eau dans les plantes* (Rev. gén. Bot., 1910) ; *Physiologie végétale* (Paris, 1911).

quantité de chlorophylle, beaucoup plus que de l'influence de la sécheresse, de l'humidité ou de l'insolation [expériences de Lhotelier<sup>(40)</sup>, de Dufour<sup>(41)</sup>].

Une feuille morte transpire plus, toutes choses égales d'ailleurs, qu'une feuille vivante<sup>(42)</sup> (Burgerstein). Si l'on compare deux surfaces égales, l'une étant une surface d'eau libre, l'autre la surface d'une feuille, la transpiration relative est le rapport des masses d'eau vaporisées pendant le même temps par la feuille (transpiration) et par l'eau libre (évaporation). Ce rapport est généralement compris entre 0,1 et 0,5; il peut cependant dépasser notablement ces limites moyennes. Il semble que la structure de la feuille tende à limiter l'évaporation.

En résumé « ce qui est une fonction, ce n'est pas le dégagement, mais la rétention de vapeur d'eau. Si la transpiration existe, c'est que la plante ne peut l'empêcher. Dans beaucoup de cas, elle est un danger pour la plante » (Leclerc du Sablon).

Cette opinion, qui n'est peut-être pas l'image exacte du phénomène réel, comporte probablement une grande part de vérité.

## 5. Réaction de la transpiration sur les autres fonctions de la plante.

a) L'eau est le constituant le plus abondant dans la cellule à l'état libre ou combiné. On peut distinguer plusieurs *modes de liaison de l'eau* dans les cellules<sup>(43)</sup>.

Une partie de l'eau se trouve sous forme d'eau de constitution, chimiquement liée sous forme de composés organiques dans le protoplasma, et qui pourrait seulement en être séparée par destruction de la cellule (eau liée par *affinité chimique*).

Une autre partie, déjà moins fortement liée, peut être, dans certains cas, enlevée sans détruire la cellule : ainsi dans le cas de mousses reviviscentes, on peut faire varier la teneur en eau entre certaines limites, suivant la tension de vapeur de l'atmosphère (eau liée par *affinité d'imbibition*, suivant les lois des solutions concentrées).

De l'eau peut, en outre, être absorbée par la cellule grâce aux substances formant de vraies solutions (eau liée par *affinité de dissolution*, ou *affinité osmotique*, suivant les lois des solutions diluées).

Une dernière portion d'eau est absorbable par les parois cellulaires (eau liée par *capillarité*).

40. LHOTELIER (A.), *Recherches sur les plantes à piquants* (Rev. gén. Bot., 1893).

41. DUFOUR (L.), *Influence de la lumière sur la forme et la structure des feuilles* (Ann. Sc. nat., 1887).

42. BURGERSTEIN, *Die Transpiration der Pflanzen. Eine physiologische Monographie* (Iéna, 1904; 2<sup>e</sup> éd., 1920).

43. Cf. MAYER (A.), *La cellule* (in Encyclopédie Française, t. IV).

La teneur relative en eau et corps dissous peut varier dans de larges limites suivant les plantes; c'est ainsi que le point de congélation du suc cellulaire peut être abaissé, par rapport à l'eau pure, de plus de 6° dans le cas d'*Opuntia*.

La cellule ne peut vivre que si elle est en équilibre avec le milieu extérieur. Celui-ci doit donc être riche en eau; en outre les valeurs des divers facteurs doivent être comprises entre les limites compatibles avec la vie de la cellule.

*b) Absorption de l'eau.*

La plante prend de l'eau au sol, alors qu'elle en perd dans l'atmosphère. Théoriquement elle ne peut vivre que si l'absorption compense l'émission. Pratiquement ces deux phénomènes sont indépendants jusqu'à un certain point. Le rapport de l'eau transpirée à l'eau absorbée est fréquemment différent de 1, comme le montrent les mesures classiques. Dans le jour, et dans les conditions ordinaires, il dépasse l'unité (1,2). Si on maintient une atmosphère constamment sèche autour de la plante, le quotient peut atteindre 4 ou 5, et bientôt la plante se fane. Dans un air très humide, le quotient descend à 0,8 ou 0,6.

L'absorption maxima est toujours inférieure aux valeurs les plus fortes que peut présenter l'émission: les plantes peuvent se faner et périr dans une atmosphère parfaitement sèche, même si leurs racines sont abondamment fournies en eau. Par exemple un plant de fève qui prospérait se fane et meurt si on double sa transpiration [Vesque<sup>(44)</sup>].

La masse d'eau contenue dans les cellules participe aux échanges. Cette masse d'eau forme, en quelque sorte, volant entre les deux phénomènes, à cause de sa lente conduction. Une variation brusque de la transpiration, par changement d'atmosphère saturée en atmosphère sèche ou inversement, ne produit que lentement une modification de l'absorption, le passage d'un régime à l'autre s'effectuant suivant une courbe régulière sans point anguleux.

Un bilan d'eau trop déficitaire fait apparaître la fanaison. Lorsque de l'eau pénètre à l'intérieur des cellules sous l'effet de la pression osmotique, elle provoque une augmentation de pression, puisque le volume reste sensiblement constant (à cause de l'élasticité limitée de la membrane pectocellulosique). Cette turgescence des tissus normaux entraîne la rigidité des organes. Inversement si l'eau n'est pas absorbée par la plante en quantité suffisante, la pression intracellulaire diminue: les tissus se flétrissent.

Les lésions ainsi produites, si elles ne sont pas trop graves, peuvent disparaître par une augmentation d'absorption ou une diminution de la transpiration. La perte d'eau tend à augmenter la concentration et surtout à diminuer la perméabilité des

---

44. VESQUE (J.), *L'absorption comparée directement à la transpiration* (Ann. Sc. nat., 1878).

parois cellulósiques : ces deux causes tendent à entraver la perte d'eau. La simple fanaison est un phénomène réversible qui disparaît si la plante retrouve des conditions hygrométriques favorables. L'abaissement de teneur en eau à partir duquel les lésions deviennent irréversibles dépend de l'espèce des plantes et de la nature des organes<sup>(45)</sup>. Pour les feuilles, la simple fanaison est réversible, tandis que la dessiccation commençante ne l'est plus. Au contraire les graines et certains tubercules peuvent subir sans dommage une dessiccation avancée.

D'ailleurs la fanaison n'est pas toujours aussi nette : elle est très visible dans les feuilles jeunes, alors que dans les feuilles âgées, dont l'épiderme est fortement cutinisé ou sclérifié, elle n'est pas apparente. Cependant l'épaisseur des feuilles âgées peut diminuer de 20 à 25 % : cela est dû surtout à la perte de turgescence du tissu lacuneux palissadique. La variation d'épaisseur est même mesurable sur les troncs d'arbres (quelques dixièmes de millimètre).

c) Les variations de teneur en eau compatibles avec l'existence de la plante varient suivant le *type biologique* de celle-ci et les conditions locales auxquelles elle est soumise.

La classification usuellement employée pour les types biologiques est la suivante :

- plantes de climats très humides (hydrophytes et hygrophytes) ;
- plantes de climats moyens (mésophytes) ;
- plantes de climats secs (xérophytes).

Les *hydrophytes*, entièrement plongées dans l'eau, ne nous intéressent pas pour l'étude de l'action de l'humidité de l'air.

Les *hygrophytes*<sup>(46)</sup>, plantes de marécages, adaptées à un milieu très humide, présentent une certaine analogie avec les plantes aquatiques : faible développement du système racinaire et des tissus de soutien, la rigidité étant assurée par la turgescence. Les feuilles sont molles, à nombreux stomates, à cuticule mince. Leur suc cellulaire est très abondant et très peu concentré. Elles se fanent pour de très légères variations de leur teneur en eau. Mais dans les conditions habituelles, leur transpiration est souvent faible : cela est dû à l'humidité atmosphérique et au peu d'action du vent sur des formations serrées où les individus rapprochés se

45. Il faut tenir compte aussi du sol. On appelle coefficient de fanaison ou point de fanaison (*Wp*) la quantité d'eau (évaluée en % du poids sec du sol) contenue dans le sol quand la plante est définitivement fanée. Dans les conditions normales, le coefficient de fanaison est, jusqu'à un certain point, indépendant de la nature de la plante, et dépend surtout du sol ; on peut adopter les valeurs moyennes suivantes : sable grossier 1,1 ; sable fin 3,3 ; limon sableux 6,2 à 10,5 ; limon argileux 15,0.

46. Cf. STOCKER (O.), *Die Transpiration und Wasserökologie nordwestdeutschen Heide- und Moorpflanzen am Standort* (Zeits. f. Bot., 1923).

protègent réciproquement. Néanmoins, le déficit de la teneur en eau par rapport au maximum peut atteindre 10 %.

Les *mésophytes*, plantes dont les conditions de vie sont moyennes, plantes des prés, plantes des bois peu touffus, poussent sur des sols habituellement humides et subissent des périodes passagères de sécheresse relative. Ce sont les plantes qui peuvent présenter les plus grandes variations; il en existe de nombreux types différents, dont certains sont plus ou moins bien caractérisés. Elles peuvent survivre en période de sécheresse; elles présentent alors, par rapport aux teneurs en eau rencontrées dans les conditions normales, des déficits pouvant varier de 20 à 40 %. Les conditions de vie moyennes sont généralement éloignées de la saturation.

Les *xérophytes*<sup>(47)</sup>, plantes des climats secs, sont celles qui peuvent supporter une sécheresse prolongée. Elles ne présentent que peu de types. Les plantes passant la saison sèche sous forme de graines supportant une dessiccation poussée et douées d'un pouvoir germinatif assez long, ainsi que les plantes qui passent la saison sèche sous forme de bulbes ou de tubercules, peuvent être considérées comme formant un premier type (d'ailleurs proche de certaines mésophytes).

Un autre type est celui des plantes grasses ou plantes succulentes, dont beaucoup sont des Cactacées. Ce sont, soit des plantes sans feuilles et à tiges épaisses, soit des plantes à feuilles épaisses et charnues. A volume égal, la surface est plus faible que pour les autres plantes. En outre la transpiration par unité de surface est très faible; les stomates ne s'ouvrent souvent que la nuit; la cuticule est épaisse. OETZIG<sup>(48)</sup> a étudié récemment la structure de l'épiderme foliaire des Mésembryanthèmes, en particulier chez les espèces fortement xéromorphes; il a trouvé une grande variété dans la cutinisation, et une répartition des localisations d'oxalate à l'intérieur de la membrane en fonction du degré de xéromorphose.

Elles peuvent absorber l'eau très rapidement, grâce à un système racinaire fin, très ramifié, et plutôt superficiel, se développant en quelques heures après une pluie. Elles peuvent accumuler une grande quantité d'eau et la retenir fortement: par exemple les tiges de certains *Opuntia* renferment 96 % d'eau. Pendant la sécheresse, les radicelles se dessèchent et meurent; les autres racines se recouvrent de liège: cela évite les pertes d'eau par les racines. En cas de sécheresse persistante, les parties âgées se dessèchent en cédant leur eau aux plus jeunes.

Un troisième type est celui des plantes xéromorphes à système racinaire très développé, profond et ramifié; les parties aériennes sont de taille relativement réduite par rapport aux racines; le système aérien présente des feuilles petites.

---

47. Cf. HUBER (B.), *Xerophyten* (Handwörterbuch der Naturwissenschaften, 2<sup>e</sup> éd., Iéna, 1934).

48. OETZIG (O.-F.), (Flora, 1940).

Le repliement du limbe des feuilles de Graminées a pour résultat de diminuer la surface transpirante, et la plante peut résister plus longtemps à la sécheresse.

La pilosité des feuilles et des rameaux est forte. Les poils épidermiques forment un feutrage qui contribue à maintenir à la surface de la feuille une mince couche d'air humide qui ralentit la transpiration. Les rameaux sont souvent épineux; les tissus scléreux et ligneux sont abondants. Les stomates se trouvent dans des cryptes ou des sillons, ce qui a pour résultat de maintenir une atmosphère humide au contact des stomates et de ralentir la transpiration. Malgré tout, ces plantes transpirent beaucoup<sup>(49)</sup>. La transpiration par unité de surface est sensiblement la même pour les plantes xéromorphes toujours vertes et les autres plantes à feuilles caduques minces (Pisek et Cartellieri).

Certaines, par suite de l'augmentation de pression osmotique consécutive à la perte d'eau par transpiration, peuvent absorber de l'eau dans des sols qui n'en renferment que 2 à 4 %.

d) *La pression osmotique.*

La transpiration tend à augmenter la concentration du contenu cellulaire, donc la pression osmotique s'élève. Mais si la pression osmotique augmente, l'activité des phénomènes vitaux, entre autres la transpiration devient moins grande. Il se produit donc, entre certaines limites, une régulation de la transpiration : un accroissement de transpiration élève la pression osmotique, ce qui tend à diminuer la transpiration. Dans certains cas, par exemple en hiver, la production de composés osmotiques par la plante tend aussi à réduire la transpiration<sup>(50)</sup> (Pisek et Cartellieri).

En outre l'élévation de la pression osmotique facilite l'absorption de l'eau du sol. Cependant, une pression osmotique élevée n'entraîne pas nécessairement une plus grande résistance à la sécheresse. Par exemple, pour les espèces des dunes algériennes, les plantes qui résistent le mieux sont celles qui ont une pression osmotique relativement faible<sup>(51)</sup> (Killian); on trouve des résultats analogues pour d'autres espèces dans d'autres régions [ainsi pour les espèces du genre *Erica* aux environs de Montpellier<sup>(52)</sup> (Giroux)].

49. MAXIMOV (N.-A.), *The plant in relation to water* (trad. Yapp, Londres, 1929).

50. PISEK (A.) et CARTELLIERI (E.), *Zur Kenntnis des Wasserhaushaltes der Pflanzen : I Sonnenpflanzen; II Schattenpflanzen* (Jahr. f. wiss. Bot., 1932).

51. KILLIAN (Ch.) et FAUREL (L.), *Observations sur la pression osmotique des végétaux désertiques et subdésertiques de l'Algérie* (Bull. Soc. bot., 1933).

KILLIAN (Ch.), (Ann. de Physiologie, XI, 1935; XII, 1936).

52. GIROUX (J.), *Recherches biologiques sur les Ericacées languedociennes* (Thèse Paris, 1936).

e) *Action sur la respiration.*

Suivant certains auteurs, l'influence du degré hygrométrique de l'air sur la respiration n'est pas négligeable. Le dégagement de gaz carbonique est d'autant plus considérable que l'atmosphère se rapproche davantage de la saturation en vapeur d'eau (Bonnier et Mangin).

D'autres auteurs considèrent que l'abaissement de la teneur en eau, s'il n'est pas excessif, ne modifie pas la respiration, et que des feuilles fanées respirent à l'instar de feuilles en pleine turgescence; l'intensité respiratoire ne baisse que si on atteint la dessiccation commençante; dans les milieux très pauvres en eau, l'intensité de la respiration est plus faible<sup>(53)</sup> (Mayer et Plantefol). Les plantes reviviscentes desséchées ont des échanges respiratoires presque nuls; ces échanges augmentent progressivement à mesure que les tissus s'imbibent; entre certaines limites, l'intensité respiratoire varie proportionnellement à la quantité d'eau fournie. Au delà d'une certaine imbibition, l'accroissement de la teneur en eau n'augmente plus l'intensité respiratoire; au contraire quelques auteurs admettent l'existence d'une légère diminution.

f) *Action sur l'assimilation chlorophyllienne.*

La transpiration, tendant à modifier la concentration du contenu cellulaire, doit agir sur l'assimilation. Dans les grandes lignes l'intensité de l'assimilation est d'autant plus grande que la teneur en eau est plus élevée. L'expérience montre, sur des feuilles non détachées de la plante, à température constante, sous un éclairage électrique d'intensité mesurée, que l'intensité d'assimilation marche parallèlement avec la teneur en eau et varie dans le même sens<sup>(54)</sup>.

L'intensité de l'assimilation n'est pas modifiée si le déficit d'eau ne dépasse pas 20 % (il semble même qu'elle soit légèrement augmentée pour un déficit faible). Elle tombe à la moitié de sa valeur maxima pour un déficit de 30 % et s'annule presque pour un déficit de 50 %. Le phénomène d'assimilation est donc plus touché que le phénomène respiratoire par la perte d'eau. On retrouve des résultats analogues dans le cas des Mousses (Plantefol).

g) *Action sur l'utilisation des substances de réserve.*

Le changement de concentration du milieu intérieur, dû aux modifications de la transpiration, entraîne des variations dans la décomposition des substances de réserve.

---

53. MAYER (A.) et PLANTEFOL (L.), *Action des facteurs du milieu sur la respiration et l'assimilation chlorophyllienne* (Ann. de Physiol., 1925, 1926, 1930).

54. DASTUR (R.-H.), *The relation between water content and photosynthesis* (Ann. of Bot., 1925).

Par exemple on sait que l'amidon disparaît par hydrolyse sous l'influence de l'amylase, et se transforme en glucides solubles pouvant circuler et être utilisés (ou transformés à nouveau en substances de réserve aux points convenables).

La rapidité de l'hydrolyse de l'amidon est influencée par les agents extérieurs. Chez les plantes vivant en atmosphère sèche, l'amidon est plus rapidement hydrolysé que chez celles qui se trouvent en atmosphère humide<sup>(55)</sup> (Molisch). Cela explique le fait d'observation que, dans les forêts tropicales humides, les feuilles n'arrivent pas à se vider complètement de leur amidon pendant la nuit (Costerus et Faber).

#### *h) Action sur la croissance.*

Les observations classiques sont d'accord sur le fait que les récoltes sont plus abondantes quand la teneur en eau est voisine du maximum. La croissance est presque complètement arrêtée par un abaissement de teneur en eau de 10 à 15 %.

Dans beaucoup de cas, la croissance ne se produit que pendant la nuit, alors que le déficit d'eau est moindre.

Pour les divers types végétaux, seules des tensions de vapeur très proches de la saturation sont susceptibles de permettre la croissance<sup>(56)</sup>.

On ne sait pas distinguer la part qui revient au déficit d'eau et celle qui revient à l'action de la lumière sur la réduction de croissance pendant le jour. On sait, en effet, que la lumière retarde la croissance.

### **6. Action morphogène d'un état hygrométrique sensiblement constant.**

#### *a) Humidité maxima ; hygromorphoses.*

La culture, dans l'air saturé d'humidité, de plantes plus ou moins xérophiles, montre que les tiges s'allongent par accroissement des entre-nœuds. Les feuilles, qui étaient en rosette, s'espacent et elles augmentent considérablement leur surface<sup>(57)</sup> (Wiesner). L'air très humide provoque l'allongement des pétioles ; il fait disparaître l'épaississement des parois ; il réduit les faisceaux et le tissu palissadique, accroît l'importance des méats intercellulaires<sup>(58)</sup> (Schimper).

Il faut citer les expériences de Lhotelier<sup>(59)</sup> sur les plantes à piquants. Il cultivait deux lots de plantes, l'un dans l'air normal, l'autre sous cloche dans un air constam-

55. MOLISCH (H.), *Microchemie der Pflanze* (Iéna, 1913); (Ber. d. d. bot., Ges. 1921).

56. WALTER (H.) : *Plasmaquellung und Wachstum* (Zeitschr. f. Bot., 1924); *Der Wasserhaushalt der Pflanze in quantitativer Betrachtung* (Naturw. und Landw., 1925).

57. WIESNER (J.), *Formänderungen von Pflanzen bei Cultur in absolut feuchtem Raume und in Dunkeln* (Ber. d. d. bot. Ges.).

58. SCHIMPER, *Pflanzengeographie auf der physiologischen Grundlage* (Iéna, 1898).

59. LHOTELIER (A.), *Recherches sur les plantes à piquants* (Rev. gén. Bot., 1893).

ment saturé d'humidité. L'action se fait sentir sur la morphologie externe et sur la morphologie interne de tous les organes végétatifs aériens. Il y a tendance à la disparition des piquants. Les feuilles, beaucoup moins épaisses, présentent une plus grande surface : la surface de transpiration est augmentée. Les stomates sont moins nombreux. On remarque la disparition partielle, ou même totale, du tissu en palissade. La cuticule est très réduite et peut même faire défaut. Les lacunes sont très développées.

Eberhardt<sup>(60)</sup> a repris des expériences du même genre. Il utilisait, soit des plantes en germination auxquelles il faisait subir des sélections successives, soit des branches de plantes comparables. Les racines étaient dans le même sol, au même degré d'hygroscopicité. Les plantes étaient soumises au même éclaircissement et placées sous des cloches ou dans des éprouvettes. L'air des cloches était constamment saturé d'humidité par des cristallisoirs remplis d'eau ; celui des éprouvettes était renouvelé deux fois par jour par soufflage d'air barbotant dans de l'eau. Les résultats obtenus pour la morphologie externe dans le cas des plantes ayant vécu dans l'air humide sont les suivants : la croissance en hauteur augmente ; la résistance et la rigidité diminuent ; la longueur des entre-nœuds augmente, mais leur nombre diminue ; les dimensions des feuilles augmentent, sauf leur épaisseur qui diminue ; la coloration est moins prononcée que dans l'air normal ; les productions piliformes sont réduites ; la floraison et l'apparition des fruits sont retardées.

Pour la morphologie interne : les dimensions et la sinuosité des parois des cellules épidermiques augmentent ; les cellules du tissu en palissade sont moins allongées et présentent souvent moins d'assises ; les lacunes sont plus développées, et se forment même s'il n'en existait pas dans l'air normal. Le bois est moins développé, par diminution du nombre des vaisseaux, et retard à la lignification ; la quantité de poils et de stomates sur les feuilles diminue.

Des résultats concordants ont été retrouvés par Lebedinzewa<sup>(61)</sup> (dans ses expériences sur le Haricot), qui note également l'accroissement de la densité de la nervation.

L'influence accélératrice de l'air humide sur le développement des plantes se fait sentir également sur les plantes inférieures : l'élévation de l'état hygrométrique accélère le développement de toutes les espèces de Mousses, même celles qui dans la nature sont exposées à des périodes de dessiccation prolongées (Mousses saxicoles et murales). Plus l'atmosphère est riche en vapeur d'eau, plus l'accroissement est rapide<sup>(62)</sup> (Davy de Virville).

---

60. EBERHARDT (Ph.), *Influence de l'air sec et de l'air humide sur la forme et sur la structure des végétaux* (Ann. Sc. nat., 1903).

61. In MAXIMOV (N.-A.).

62. DAVY DE VIRVILLE (A.), *L'action du milieu sur les Mousses* (Rev. gén. Bot., 1927).

b) *Sécheresse maxima; xéromorphoses.*

Eberhardt<sup>(63)</sup> a également étudié l'action de l'air très sec.

L'air des cloches où se trouvaient les plantes était maintenu sec par de l'acide sulfurique changé tous les deux jours; celui des éprouvettes était remplacé deux fois chaque jour par de l'air desséché par passage sur du chlorure de calcium.

Les résultats ainsi obtenus pour la morphologie externe sont les suivants : l'air sec réduit l'allongement mais augmente souvent le diamètre des organes; il accroît la résistance et la rigidité; il diminue la longueur des entre-nœuds, mais augmente souvent leur nombre. Il diminue les dimensions des feuilles, sauf l'épaisseur, qu'il augmente. Les productions piliformes augmentent; la coloration est plus intense. La floraison, la formation des fruits sont plus hâtives.

Pour la morphologie interne, les résultats sont encore opposés à ceux fournis par l'air humide. Dans l'air sec, la sinuosité et les dimensions des cellules épidermiques diminuent; les dimensions de l'écorce et de la moelle décroissent; le bois est plus développé : les vaisseaux sont plus nombreux et à parois plus épaisses.

L'épaisseur des feuilles augmente parce que le tissu en palissade est très développé. Les lacunes sont moins nombreuses et plus petites. La production des poils et le nombre des stomates sont augmentés à surface égale.

Des résultats analogues ont été trouvés pour les végétaux inférieurs : la dessiccation continue de l'atmosphère entraîne un arrêt du développement de toutes les espèces de Mousses, même celles qui sont le plus xérophiles dans la nature<sup>(64)</sup> (Davy de Virville).

Les réactions morphogènes provoquées par l'air sec sont analogues à celles que produisent les éclaircissements intenses. Cela semble dû à l'accroissement de concentration des tissus en substances solubles<sup>(65)</sup> (Molliard).

Ces réactions morphogènes dues à l'air sec sont aussi semblables à celles que provoque un manque d'eau du sol : la faible teneur en eau du sol produit la xéromorphose, comme le montrent les expériences de Lebedinzewa<sup>(66)</sup> sur le Haricot : des haricots cultivés en serre, avec une humidité du sol égale à 30 % de la capacité totale en eau, et les autres avec 60 % de la capacité en eau, ont des feuilles présentant les mêmes différences de structure que ceux cultivés à l'air sec ou à l'air humide. De même les expériences de Tumanow<sup>(67)</sup> sur la culture de plantes en pots au soleil : les unes régulièrement arrosées, les autres étant abandonnées plus longtemps à l'état flétri ont donné des résultats concordant avec les expériences précédentes.

63. EBERHARDT (Ph.), *loc. cit.*

64. DAVY DE VIRVILLE (A.), *loc. cit.*

65. MOLLIARD (M.), *Nutrition de la plante* (Paris, 1921-1925).

66. *In* MAXIMOV.

67. *In* MAXIMOV, *loc. cit.*

Walter<sup>(68)</sup> a repris l'hypothèse de Molliard en la généralisant. La lumière, la sécheresse de l'air, la faible teneur en eau du sol, la basse température, ont toutes pour résultat d'augmenter la pression osmotique du suc cellulaire. Cela permet d'expliquer le fait que des facteurs aussi différents produisent des variations morphologiques semblables. L'augmentation de la pression osmotique doit nécessairement modifier les processus de croissance : par exemple, une moindre teneur en eau du plasma raccourcirait la période de croissance de la cellule, qui se différencierait plus vite et resterait plus petite. On pourrait faire passer au second plan le critérium de transpiration, de façon à mettre en valeur l'influence de la pression osmotique.

Ayant ainsi montré les opinions actuelles sur les phénomènes d'évaporation au point de vue physique et sur les phénomènes de transpiration et leur action morphogène, nous allons étudier plus spécialement ce qui se passe en montagne au sujet de ces diverses questions.

---

68. WALTER (H.) : *Der Wasserhaushalt der Pflanzen in quantitativer Betrachtung* (1926); *Die Anpassungen der Pflanzen an Wassermangel. Das Xerophytenproblem in kausal-physiologischer Betrachtung* (Freising-Munich, 1925 et 1926).

---

## TROISIÈME PARTIE

### **Influence de l'altitude sur les variations de l'humidité atmosphérique et sur l'évaporation.**

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU CLIMAT PYRÉNÉEN.

---

#### CHAPITRE VI

#### **Les variations de l'humidité de l'air dans les climats de plaine et de montagne.**

##### **1. Nécessité d'une étude comparée des variations de l'humidité de l'air en plaine et en montagne.**

L'étude de l'action des alternances de sécheresse et d'humidité sur les plantes, si intéressante qu'elle soit en elle-même, ne doit pas être uniquement une curiosité de laboratoire. Elle sera plus utile s'il est possible de rencontrer des actions analogues dans l'étude des conditions naturelles.

Les données des observatoires météorologiques fournissent l'allure générale moyenne des phénomènes. On connaît la marche journalière moyenne de la transpiration des plantes dans nos régions<sup>(1)</sup>. Très faible et parfois nulle le matin vers 6 heures, elle augmente assez rapidement et passe par un maximum vers 14 heures; elle décroît assez lentement jusque vers 18 heures, et s'annule presque vers 22 heures.

Le facteur essentiel est l'état hygrométrique de l'air, ou plus exactement le déficit de saturation; à son action viennent se superposer celles de la température, des vents, de la lumière, de la pression atmosphérique. Or l'altitude a une influence marquée sur tous ces facteurs.

Il est donc important de comparer d'une façon détaillée les valeurs de l'humidité atmosphérique en plaine et en montagne: on verra lequel de ces climats offre des variations d'humidité de l'air se rapprochant des conditions réalisées dans mes expériences.

---

1. Cf. PLANTEFOL (L.), Cours de Botanique, t. I.

## 2. Nomenclature des étages de végétation.

L'étude des pays montagneux risque de se heurter à des complications dues au fait que les auteurs n'utilisent pas toujours les mêmes conventions. Il faut avant tout préciser quelles sont les altitudes envisagées. Mais l'altitude seule ne suffit pas à caractériser le climat : il faut tenir compte aussi de la position géographique des masses montagneuses et de la région climatique où elles se trouvent. Il faut distinguer aussi les montagnes du centre des massifs, et les montagnes d'altitude plus faible situées en avant des grandes chaînes : dans le domaine marginal, les effets du climat de montagne sont moins marqués.

La nomenclature des niveaux varie, suivant les auteurs, pour la même région. Il est donc utile de préciser celle que l'on adopte.

Je me bornerai exclusivement aux Alpes et aux Pyrénées. D'après Flahault<sup>(\*)</sup> « il est hors de doute que les Alpes et les Pyrénées forment bien deux éléments d'une même région naturelle ».

Les variations en altitude des facteurs climatiques déterminent dans la montagne une série de niveaux ou d'étages de végétation, superposés en altitude, et représentant d'une manière générale des tranches plus ou moins horizontales de même caractère phytogéographique.

Ces étages sont souvent nommés d'après l'essence forestière la plus caractéristique.

Ce sont les zones de Flahault<sup>(\*)</sup>, les cliseries de del Villar<sup>(\*)</sup>.

Il est préférable de réserver, ainsi que l'avait déjà proposé Flahault, et comme le fait Gaussen<sup>(\*)</sup>, le mot étage pour la montagne, et le mot zone pour les divers types se succédant géographiquement en plaine.

L'influence des milieux rocheux, tourbeux, etc., conduit à distinguer des étages spéciaux, sortes de sous-étages : ce sont les « horizons » de Flahault.

Selon la nomenclature des territoires de Flahault, je considère seulement dans la « région » des hautes montagnes d'Europe, le « domaine » des Alpes et celui des Montagnes Ibériques. Comme il ne s'agit pas d'une étude complète, je prendrai comme exemples, pour les Alpes, les « districts » savoisien et dauphinois, auxquels je joins les Préalpes correspondantes ; et pour les Pyrénées, les districts des Pyrénées orientales et des Pyrénées centrales<sup>(\*)</sup>.

2. FLAHAULT (Ch.), *La flore et la végétation de la France* (Introduction à la Flore de France de Coste, Paris, 1901; 2<sup>e</sup> tirage, 1937).

3. FLAHAULT, *loc. cit.*

4. VILLAR (E.-H. DEL), *Geobotanica* (Coleccion Labor, Barcelona-Buenos Aires, 1929).

5. GAUSSEN (H.), *Géographie des Plantes* (Paris, 1933).

6. Cf. BÉNÉVENT (E.), *Le climat des Alpes françaises* (Mémorial de l'O. N. M., Paris, 1926).

GOUJON (G.), *Les relations entre la végétation française et le climat* (Mémorial de l'O. N. M., Paris, 1932).

A la base, on rencontre un étage agricole qui peut s'élever jusqu'à l'établissement du Hêtre. On rencontre en s'élevant progressivement le Chêne-vert puis les Chênes pubescent et sessile; celui-ci disparaît vers 1.000<sup>m</sup> dans les Alpes, vers 1.100<sup>m</sup> dans les Pyrénées centrales sauf aux expositions favorables.

Le Hêtre paraît correspondre au maximum de degré hygrométrique; il s'arrête vers 1.500<sup>m</sup> dans les Alpes, 1.600<sup>m</sup> dans les Pyrénées. Il est remplacé progressivement par les Conifères; ils commencent à être abondants vers 1.200<sup>m</sup> et montent jusque 2.000<sup>m</sup> ou 2.100<sup>m</sup> environ dans les Alpes, et 2.200<sup>m</sup> à 2.300<sup>m</sup> environ dans les Pyrénées. Il faut séparer le Sapin, essence d'ombre et d'humidité, des autres qui veulent de la lumière.

Au-dessus, la forêt proprement dite est remplacée sur 200<sup>m</sup> environ par des espèces de la forêt supérieure, rabougries, et des buissons.

Les forêts de Conifères, caractérisées par le Sapin, puis le Pin à crochets dans les Pyrénées, peuvent être subdivisées dans les Alpes en divers horizons: celui du Sapin, du Pin sylvestre, de l'Epicéa, du Mélèze et du Pin cembro.

L'étage compris entre 800 ou 900<sup>m</sup> et 1.700<sup>m</sup> environ, correspondant aux forêts à feuilles caduques et au Sapin, est l'étage *montagnard* de Gaussen, subalpin de divers auteurs.

L'étage correspondant aux autres Conifères (1.700<sup>m</sup> à 2.400<sup>m</sup> environ) est l'étage *subalpin* de Gaussen, alpin inférieur d'autres auteurs. Enfin, au-dessus de 2.400<sup>m</sup> environ, où les arbres ne sont plus possibles, c'est l'étage *alpin* de Gaussen, alpin supérieur d'autres auteurs. On désigne parfois l'ensemble des étages de 800<sup>m</sup> à 1.700<sup>m</sup> environ sous le nom d'étage forestier.

Naturellement, les indications d'altitudes sont des moyennes: ces valeurs dépendent d'un grand nombre de facteurs; l'orientation des pentes les modifie considérablement. D'autre part la limite supérieure de la forêt décroît quand on passe du centre des massifs à l'extérieur: elle est remplacée par des prairies pseudo-alpines. Ainsi, dans les Pyrénées, les massifs extérieurs perdent, au point de vue phytogéographique, leur caractère de haute montagne pour prendre celui de marges à caractère propre; la limite des forêts sur ces marges (?) se trouve vers 1.900<sup>m</sup>.

La latitude a une influence marquée.

L'influence de l'Atlantique se fait sentir davantage à mesure qu'on s'avance vers l'ouest des Pyrénées: la limite supérieure de l'étage forestier s'abaisse progressivement; de même, le nombre d'espèces forestières diminue.

Il faut donc faire les plus extrêmes réserves sur les limites en altitude des divers étages, et ne pas leur accorder une valeur absolue. Ces restrictions faites, nous parlerons cependant d'étages montagnard, subalpin et alpin, en adoptant la nomenclature de Gaussen.

---

7. BOUGET (J.), *Sur quelques points de la géographie botanique dans les Pyrénées centrales françaises* (Bull. Soc. Ramond, 1908).

### 3. Limitation des périodes étudiées. Choix des stations.

Il est utile de remarquer dès le début qu'il s'agit de l'action sur les parties aériennes des plantes. On pourra donc limiter la comparaison approfondie des climats aux périodes de végétation.

Comme stations permettant une étude aisée de l'influence de l'altitude, les observatoires de Bagnères-de-Bigorre et du Pic du Midi sont heureusement disposés. Ils sont voisins : leur distance horizontale n'est que de 14<sup>km</sup>,5 ; leur altitude diffère considérablement, la station de Bagnères étant à une altitude de 565<sup>m</sup>, celle du Pic à 2.859<sup>m</sup>.

### 4. Établissement des limites des périodes de comparaison approfondie.

Au Pic du Midi on peut considérer que la durée utile de végétation s'étend sur les mois de juillet, août et septembre.

En effet si on se reporte aux notes de Marchand et Bouget<sup>(8)</sup> sur le jardin d'essai et le jardin alpin de l'Observatoire du Pic du Midi, on trouve en moyenne de 1899 à 1903 le jardin d'essai complètement découvert vers le 25 juillet ; le jardin alpin était complètement débarrassé de neige vers le 10 juillet. La neige vers le 10 novembre subsiste et marque le début de l'hivernage.

Le *Bulletin de l'Institut et Observatoire de Physique du Globe du Pic du Midi*<sup>(9)</sup> nous donne comme dates de fusion totale de la neige sur la terrasse de l'Observatoire :

En 1927	fusion totale de la neige	le	13 juillet
— 1928	—	—	3 juillet
— 1929	—	—	7 juillet
— 1930	—	—	21 juillet
— 1931	—	—	15 juillet
— 1932	—	—	31 juillet
— 1933	—	—	20 juillet
— 1934	—	—	30 juin
— 1935	—	—	15 juillet.

8. MARCHAND (E.) et BOUGET (J.) : *Le Jardin botanique alpin de l'Observatoire du Pic du Midi; Quelques observations faites dans ce jardin de 1900 à 1903* (Ass. fr. av. Sciences, Congrès de Grenoble, 1904).

9. *Météorologie* (1926-27-28), par J. DORT.

*Météorologie* (1929-30), par J. DORT.

*Météorologie* (1931-32), par J. DORT.

*Météorologie* (1933-34), par J. DORT.

*Météorologie* (1935-36), par M. TAULE.

Après quelques jours de beau temps, le réveil général de la végétation est nettement visible. Celle-ci est rapide mais de courte durée.

Les dates marquant l'arrêt de la végétation sont moins nettement déterminées, des chutes de neige suivies de fusion et plus ou moins rapprochées pouvant laisser subsister une certaine incertitude<sup>(10)</sup>. On peut admettre qu'en moyenne vers la mi-octobre la végétation est arrêtée.

L'action sur la structure des parties aériennes des plantes de montagne peut donc être considérée comme s'étant exercée dans les mois de juillet, août et septembre. C'est surtout sur ces trois mois que nous étudierons les variations de l'humidité dans le climat de montagne. Après un résumé des données générales sur l'humidité atmosphérique en montagne, nous examinerons les particularités des courbes de l'hygromètre enregistreur du Pic du Midi.

##### 5. Généralités sur l'humidité de l'air en montagne, d'après les études de divers auteurs sur les Alpes.

La teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère décroît à mesure qu'on s'élève. Sa diminution est beaucoup plus rapide que celle de la pression atmosphérique. Par exemple les valeurs suivantes extraites d'un tableau de Hann<sup>(11)</sup> donnent une idée de ces variations. En prenant pour unités la tension de la vapeur d'eau et la pression atmosphérique au niveau de la mer, on a :

Altitude (en mètres)	Tension de la vapeur d'eau atmosphérique	Pression atmosphérique
0	1	1
1.000	0,73	0,88
2.000	0,49	0,78
3.000	0,35	0,69
4.000	0,24	0,61

(valeurs calculées d'après les formules théoriques).

L'humidité relative ne présente pas de variation régulière avec l'altitude; d'ailleurs elle varie généralement peu. Hann cite l'exemple des Alpes du Valais : en moyenne annuelle, l'humidité relative qui atteint 72 % à 500<sup>m</sup>, passe à 78 % à 2.000<sup>m</sup> et

10. La réapparition de la neige persistante se produit généralement au Pic dans le courant d'octobre ou novembre, à une date variable selon les années.

11. HANN, *Handbuch der Klimatologie*.

82 % à 3.300<sup>m</sup>, alors que la valeur absolue de la tension de la vapeur d'eau est respectivement 6<sup>mm</sup>,8; 4<sup>mm</sup>,1; 2<sup>mm</sup>,6. Les Pyrénées comme nous le verrons (§ 7 de ce chapitre) n'offrent pas une variation parallèle à celle des Alpes.

En ce qui concerne la *variation annuelle de l'humidité relative*, aux grandes altitudes dans les Alpes, le minimum a lieu en hiver. C'est, en effet, l'hiver qui est la saison la plus sèche et la plus claire; le printemps et l'été sont les saisons les plus humides et les plus sombres, au contraire de ce qui se passe aux basses altitudes. Hann cite des moyennes saisonnières de diverses stations : les hautes altitudes présentent un maximum de l'humidité relative au printemps ou en été, alors que Vienne et Genève par exemple présentent un minimum en été. Nous trouverons ici aussi des résultats différents dans le cas des Pyrénées (§ 7).

La *variation journalière de l'état hygrométrique* a été peu étudiée. Hann, pour le Sonnblick (3.100<sup>m</sup>) a trouvé les résultats suivants<sup>(12)</sup> : le minimum d'humidité relative se produit, pendant toute l'année, dans la matinée entre 8 et 9 heures; le maximum a lieu, en hiver, après midi, et pendant les autres saisons entre 20 et 22 heures environ. Comme autres résultats, les observations d'été au Faulhorn et aux Grands-Mulets montrent le minimum à 10 heures, et le maximum entre 18 et 20 heures. L'étude de la *variation journalière de la tension de la vapeur d'eau atmosphérique* montre l'existence d'un minimum le matin et d'un maximum après midi (entre 15 et 16 heures au Sonnblick) pour toutes les stations d'altitude. Dans les Alpes, vers 2.800<sup>m</sup>, les écarts par rapport à la moyenne journalière sont, d'après Hann :

Heures	0	4	8	12	16	20
Humidité absolue (en mm)	-0,30	-0,50	-0,37	+0,40	+0,67	+0,09
Humidité relative (en %).	+0,4	-0,7	-3,9	-2,5	+3,5	+3,1

Il y a minimum de l'humidité relative vers 10 heures (-4 %) et maximum vers 18 heures (+4 %).

L'humidité aux grandes altitudes en montagne est caractérisée par un changement rapide et des extrêmes marqués. La saturation complète de l'air (nuages au niveau du sol) alterne fréquemment avec une grande sécheresse. En particulier sur les hauts sommets isolés ces variations sont nombreuses et extrêmes, et s'accompagnent de changements de température analogues. A partir d'une certaine altitude, les

12. HANN (J. VON), *Die Verhältnisse der Luftfeuchtigkeit auf dem Sonnblickgipfel* (Sitzungsber. d. Wien. Akad., 1895).

montagnes, par mauvais temps, sont constamment entourées de nuages, ce qui entraîne la saturation de l'air; par beau temps, la sécheresse devient très grande.

Aux basses altitudes l'air se sature parfois, pendant la saison chaude, aux heures de la nuit et du matin (brouillard matinal).

L'évaporation en haute montagne est plus active qu'à basse altitude (pour la même humidité, la même température, la même force du vent) à cause de la diminution de pression.

#### 6. Variation avec l'altitude de l'humidité relative dans les Pyrénées.

Nous avons vu dans ce chapitre (§ 5) que l'humidité de l'air ne présente pas de variation régulière avec l'altitude. On ne peut prévoir a priori comment elle se comportera. Il est donc intéressant d'avoir des données expérimentales sur sa variation dans les montagnes que l'on veut étudier. Ce travail a été fait par Gausсен<sup>(13)</sup> pour les divers étages de végétation dans la partie des Pyrénées qui nous intéresse. Il a effectué un grand nombre de mesures avec un hygromètre portatif et il donne les moyennes de ses résultats. Grâce à ses données, on a immédiatement l'allure de la variation cherchée.

Etage	Altitude	Humidité relative
Olivier .....		68
Chêne-vert .....		66
Chêne-vert + Chêne-rouvre .....		71,5
Chêne-rouvre .....		79
Chêne - Hêtre .....	1.100 <sup>m</sup>	85
Hêtre .....		85,5
Hêtre - Sapin .....		88,5
Sapin .....	1.500 <sup>m</sup>	82
Pâturages pseudo-alpins .....		85
Pin à crochets .....		61
Pâturages alpins .....	2.400 <sup>m</sup>	58

13. GAUSSEN (H.), *Végétation de la moitié orientale des Pyrénées* (Bull. soc. hist. nat., Toulouse, LV, 1926).

La concordance de ces nombres avec ceux des stations météorologiques est excellente pour les basses altitudes.

Ce qui saute immédiatement aux yeux quand on parcourt ce tableau, c'est la diminution de l'humidité relative, sensible pour l'étage du pin à crochets, et tout à fait marquée pour les pâturages alpins. Cependant, à titre de contrôle, la moyenne, pour l'intervalle de temps correspondant, du Pic du Midi (62) est peu différente de celle (58) trouvée par Gausson pour les pâturages alpins. Ce nombre, 58, n'est pas dû à un écart accidentel, mais il doit correspondre à la réalité.

On voit donc que, contrairement à ce qui se passe dans les Alpes<sup>(14)</sup>, l'humidité relative marque une diminution nette pour l'étage alpin dans les Pyrénées.

Ayant ainsi l'allure générale des variations de l'humidité relative, nous pouvons passer à une étude plus détaillée, en utilisant les résultats de séries d'observations continues.

## 7. L'humidité atmosphérique au Pic du Midi comparée à celle de Bagnères.

### a) Variation des moyennes saisonnières.

Nous pouvons étudier rapidement la marche annuelle de l'humidité à l'aide des résultats donnés par l'Observatoire du Pic du Midi.

L'humidité relative moyenne pour chaque saison (d'après les observations faites pendant 55 ans au Pic et 38 ans à Bagnères), est la suivante :

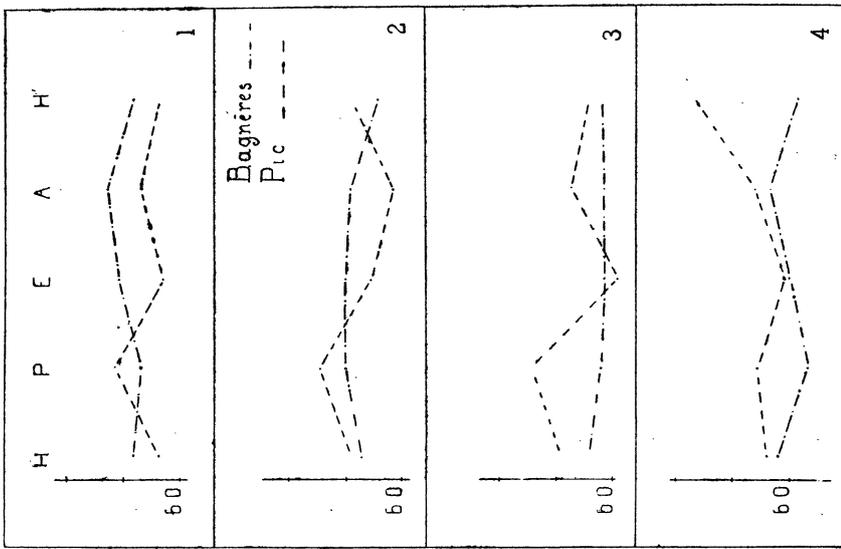
	Pic du Midi	Bagnères
Hiver.....	63,7	68,1
Printemps.....	71,3	66,8
Eté.....	63,2	70,5
Automne.....	66,9	72,7
Année.....	66,3	69,5

Ces résultats sont représentés sur le graphique ci-contre (*fig. II, 1*).

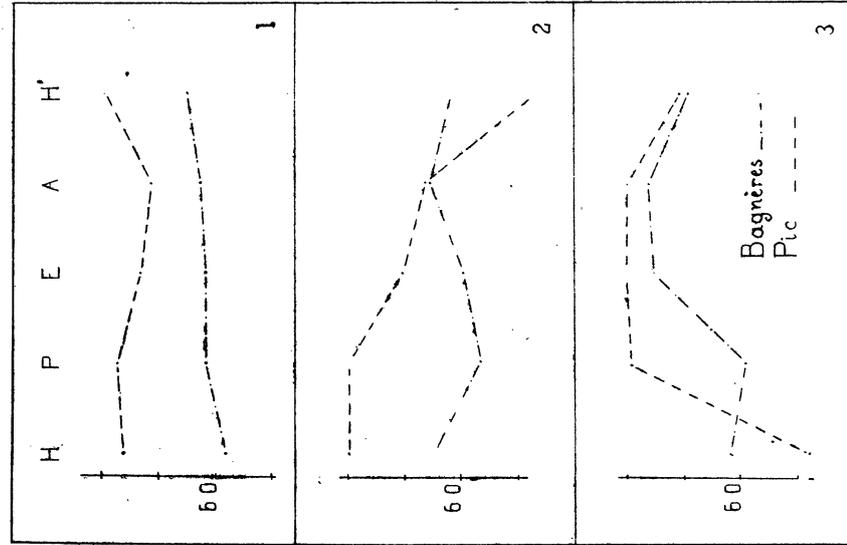
Ici encore on peut noter une différence avec les Alpes.

Au Pic du Midi, d'après ces moyennes, le maximum a lieu au printemps; un second maximum plus faible que le premier se produit à l'automne. Les minimums ont lieu en été et en hiver. Le maximum de printemps est d'accord avec la règle

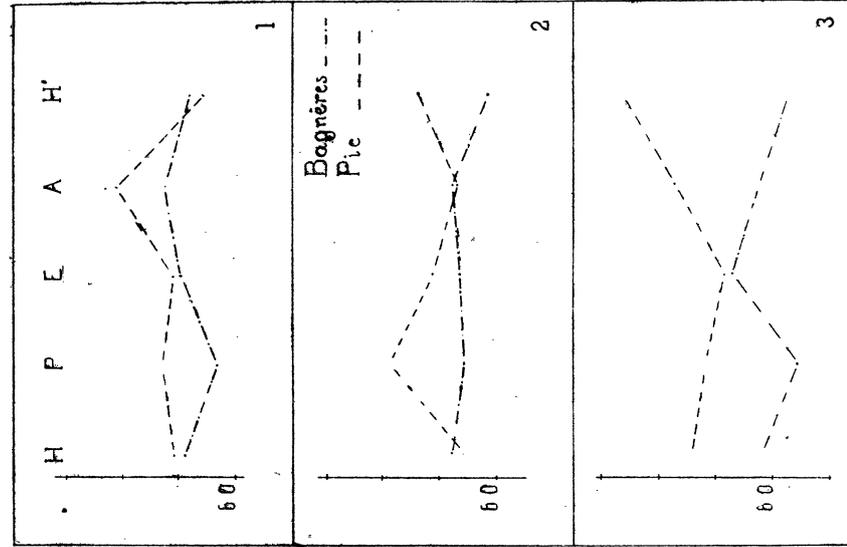
14. Cf. § 5, la valeur 82 à 3.300<sup>m</sup> dans les Alpes du Valais, pour 78 à 2.000<sup>m</sup>.



II



III



IV

FIG. II à IV. — HUMIDITÉ RELATIVE AU PIC DU MIDI ET A BAGNÈRES-DE-BIGORRE. MOYENNES SAISONNIÈRES.

1) Marche saisonnière de l'humidité relative, d'après les moyennes de 55 années pour le Pic et de 38 années pour Bagnères.

En abscisses les saisons désignées par leur initiale; en ordonnées, l'humidité relative.

La courbe du Pic est en tireté, celle de Bagnères en tireté ponctué.

2) Moyennes saisonnières pour 1927; H P E A correspondent à l'année 1927.

H' correspond à l'hiver suivant (1927-28).

3) Moyennes saisonnières pour 1928 (et hiver 1928-29).

4) — — — — — pour 1929 (et hiver 1929-30).

1) Année 1933.

2) — 1934.

3) — 1935.

générale : les hautes altitudes présentent un maximum de l'humidité relative au printemps ou en été.

A Bagnères le maximum se présente en automne, mais le minimum est au printemps, au lieu d'être en été comme dans les stations plus continentales.

Mais ce sont là des résultats moyens, pouvant s'écarter fortement des observations de chaque année prise séparément, ainsi que le montrent les courbes (*figures II, III, IV*).

Même si on laisse de côté les données correspondant à l'hiver (puisque l'indication des appareils par temps de gelée est toujours plus ou moins incertaine), on trouve des résultats assez différents d'une année à l'autre. D'après les moyennes on aurait au Pic du Midi, le maximum d'humidité relative au printemps et le minimum en été; il arrive fréquemment que le maximum ait lieu à l'automne (par exemple sur les années de 1926 à 1936, ce fait s'est produit en 1929, 1930, 1931, 1932, 1933).

L'été ne correspond pas toujours au minimum; l'examen, même rapide, des courbes le montre (*fig. II, III, IV*).

#### b) *Variation des moyennes mensuelles.*

Au lieu de considérer les moyennes par saison, on peut considérer les moyennes de chaque mois : ici encore les résultats diffèrent notablement d'une année à l'autre (*figures V, VI, VII*).

#### c) *Variation diurne.*

Nous retrouvons ici aussi des écarts notables entre les valeurs d'une année déterminée et les valeurs moyennes calculées sur un grand nombre d'années d'observations.

Comme je l'ai déjà remarqué, au point de vue végétation, c'est surtout pour les mois de juillet à septembre que l'humidité atmosphérique joue un rôle capital, aux altitudes de l'ordre de 2.800<sup>m</sup>.

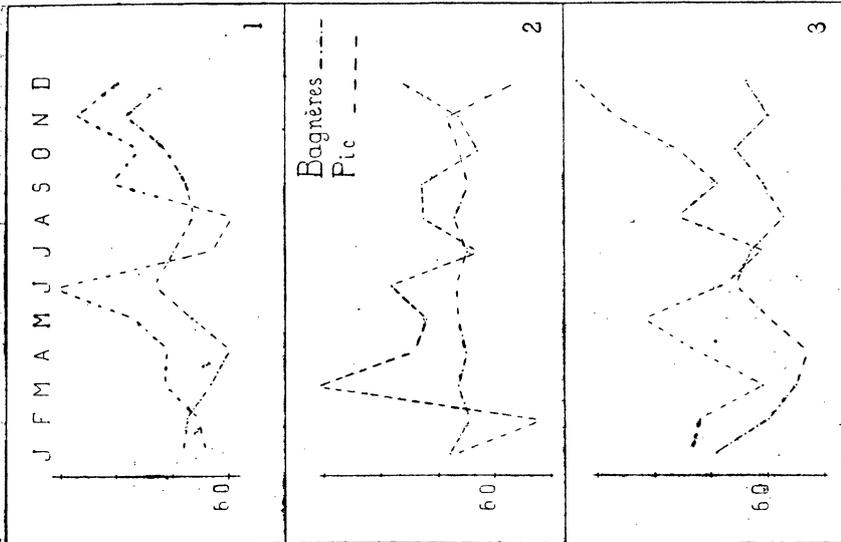
Toutefois, afin de donner un aperçu complet, je résumerai très rapidement l'étude de la variation diurne de l'humidité relative pendant les autres mois.

Pour cette étude j'ai utilisé les courbes des appareils enregistreurs du Pic du Midi et de Bagnères, particulièrement celles des années 1935 à 1940.

#### AU PIC DU MIDI.

##### *Période.*

La première remarque qui s'impose lorsque l'on compare les courbes des enregistreurs relevées au Pic et à Bagnères, est que les courbes du Pic semblent très capricieuses, alors que celles de Bagnères présentent une régularité évidente. Les époques des maximums ou des minimums varient souvent de plusieurs heures

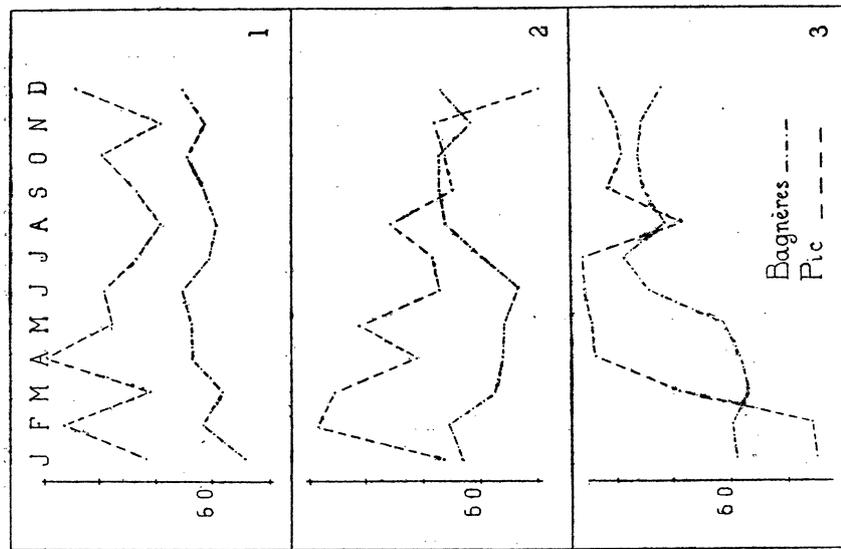


VII

Fig. V à VII. — HUMIDITÉ RELATIVE AU PIC DU MIDI ET A BAGNÈRES-DE-BIGORRE. MOYENNES MENSUELLES.

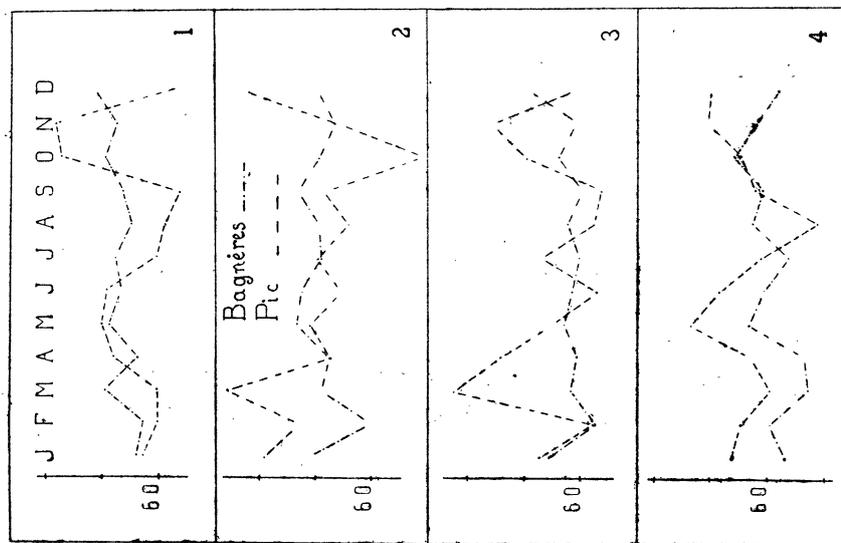
- 1) Année 1933.
- 2) — 1934.
- 3) — 1935.

(Pour l'année 1935, la valeur de juillet au Pic a été calculée sur 25 jours; celle d'août à Bagnères a été calculée sur 21 jours).



VI

- 1) Année 1930.
- 2) — 1931.
- 3) — 1932.



V

En abscisses les mois.  
En ordonnées les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative.

Les courbes du Pic sont en trait tireté ;  
celles de Bagnères en trait tireté ponctué :

- 1) Année 1927.
- 2) — 1928.
- 3) — 1929.

du jour au lendemain, et la recherche de moyennes n'est pas très aisée; cela est particulièrement notable pour les mois d'hiver.

Il faut remarquer aussi que la saturation se produit souvent de façon prolongée au Pic, surtout pendant les mois d'hiver, de sorte que les maximums et les minimums ne correspondent à rien de tangible pour ces intervalles.

Ces réserves étant faites, voici quelles sont les indications générales que l'on peut donner sur l'état hygrométrique.

En janvier, on observe un minimum vers 11 heures en moyenne, mais l'époque de ce minimum est très variable. Pour le maximum, on peut seulement dire que l'air est souvent saturé pendant de longs intervalles.

Pour février, on trouve les mêmes résultats que pour janvier : minimum un peu après 11 heures en moyenne, mais très variable d'un jour à l'autre.

En mars le minimum a lieu en moyenne vers 12 heures, mais il est toujours très variable.

En avril, minimum en moyenne vers 11 à 12 heures, variable; le maximum est atteint vers 19 ou 20 heures (quand il n'y a pas saturation presque continue).

En mai, minimum variable entre 10 et 13 heures; maximum vers 20 heures, variable.

En juin le minimum s'observe vers 11 à 12 heures, le maximum vers le début de la nuit : souvent il est déjà presque atteint vers 16 heures.

En juillet le minimum a lieu vers 11 heures (variable entre 8 et 12 heures); le maximum est atteint souvent dès 16 heures.

En août, minimum vers 11 heures; maximum atteint dès 16 ou 17 heures.

En septembre, minimum un peu après 11 heures en moyenne, maximum presque atteint vers 16-17 heures.

Octobre : minimum vers 12 heures en moyenne; saturation souvent atteinte dès 16 à 18 heures (variable).

Novembre : minimum vers 12 heures, très variable; saturation souvent atteinte dès 15 heures.

Décembre : minimum entre 11 et 13 heures très variable; saturation souvent atteinte vers 16 heures (variable).

#### *Amplitude.*

Au Pic du Midi, l'amplitude est considérable. On trouve souvent, dans le courant d'une même journée, des variations de l'état hygrométrique dépassant 35 %; il n'est pas rare qu'elles atteignent 45 %.

Il faut noter le contraste marqué entre les états hygrométriques successifs, ce qui confirme l'observation courante caractérisant le climat de montagne comme présentant des extrêmes.

## A BAGNÈRES-DE-BIGORRE.

*Période.*

L'observation des courbes montre une bonne régularité.

En janvier, février, mars, on observe le minimum un peu après 11 heures. En général, le maximum se produit pendant la nuit, à une heure variable, mais il est souvent presque atteint dès 18 ou 19 heures.

En avril-mai, le minimum se produit vers 12 heures; le maximum a lieu entre minuit et 2 heures en moyenne.

En juin : minimum un peu après 12 heures; maximum vers 3-4 heures en moyenne.

En juillet-août : minimum vers 13-14 heures; maximum vers 4 heures.

Septembre : minimum vers 13 heures; maximum au cours de la nuit; l'air est presque saturé pendant une bonne partie de la nuit.

Octobre : minimum vers 12 heures; maximum atteint vers 20 heures et se prolongeant dans la nuit.

Novembre-décembre : minimum en moyenne de 11 à 12 heures, variable; maximum déjà presque atteint vers 17 ou 18 heures.

*Amplitude.*

Les courbes de Bagnères, beaucoup plus régulières d'allure que celles du Pic, présentent aussi des écarts plus faibles entre le maximum et le minimum de la journée; l'amplitude de la variation diurne de l'état hygrométrique ne dépasse pas en général 25 %.

d) *Variations de courte durée.*

Mes expériences essaient de mettre en évidence une action de la période plus ou moins longue des variations de l'état hygrométrique. Il est utile de chercher s'il est possible de trouver dans la nature des variations analogues et surtout de se rendre compte si on trouve ou non les mêmes variations aux différentes altitudes. Il ne peut être question de trouver une période au sens rigoureux du mot, mais la variation peut se produire assez régulièrement.

Nous nous bornerons pour l'examen des détails des courbes aux mois de juillet, août, septembre, correspondant à l'époque de végétation en montagne.

Soit la courbe relative à une journée déterminée. Nous pouvons considérer la courbe réelle donnée par l'enregistreur comme la somme de deux courbes : l'une, la courbe fondamentale représentant la variation diurne, l'autre représenterait les variations de durée plus faible et d'intensité moins grande. La première serait celle que l'on pourrait obtenir avec un appareil enregistreur plus « paresseux » que les appareils habituels. La seconde caractérise en quelque sorte les détails : elle représente les écarts par rapport à la première courbe considérée comme moyenne.

C'est l'allure de la seconde courbe que nous cherchons à déterminer. Nous avons à considérer deux éléments : sa « période » au sens large du mot, et son amplitude, c'est-à-dire la valeur absolue de l'écart en plus ou en moins par rapport à la courbe fondamentale.

#### AU PIC DU MIDI.

##### *« Période » des variations de courte durée.*

On peut avoir une idée de la fréquence des variations en comptant les petits crochets présentés par la courbe. En juillet et août il n'est pas rare de trouver pour une journée 40 et même 50 de ces crochets. Comme la plupart correspondent aux heures de jour, on peut considérer que cela représente à peu près une période moyenne d'un quart d'heure. La fréquence diminue en septembre ; d'ailleurs à cette époque il arrive souvent que l'état hygrométrique corresponde sensiblement à la saturation.

##### *Amplitude des variations de courte durée.*

La considération des maximums et minimums relatifs successifs conduit à définir une amplitude des variations par rapport à la courbe fondamentale ; cette amplitude sera mesurée par la valeur absolue de l'écart en plus ou en moins par rapport à la courbe fondamentale.

En juillet et août au Pic du Midi on observe des écarts pouvant atteindre 20 à 25 degrés hygrométriques ; d'ordinaire ils sont moins accusés et portent sur 8 à 10 degrés hygrométriques.

En septembre, l'amplitude des variations secondaires est plus faible ; d'ailleurs comme on l'a déjà remarqué, l'état hygrométrique est souvent voisin de la saturation.

#### A BAGNÈRES-DE-BIGORRE.

##### *Période des variations de courte durée.*

En général, on trouve par 24 heures un nombre de périodes au moins égal à celui obtenu au Pic, et souvent nettement supérieur. La période moyenne des variations de courte durée à Bagnères, d'après les courbes des enregistreurs, est d'environ 10 minutes.

##### *Amplitude des variations de courte durée.*

En juillet, on observe des amplitudes maxima de 7 degrés hygrométriques ; en moyenne les amplitudes sont de 2 à 3 degrés. Pour ce mois, l'amplitude des variations de courte durée est plus faible à Bagnères qu'au Pic du Midi.

L'amplitude augmente en août : elle atteint celle du Pic, et la dépasse parfois.

En août, à Bagnères, les variations de l'état hygrométrique se produisent aussi aux heures de la nuit, alors qu'en règle générale l'état hygrométrique est plus élevé et plus constant pendant la nuit.

En septembre l'état hygrométrique est souvent proche de la saturation pendant la nuit. L'amplitude des variations secondaires, en septembre, à Bagnères, est à peu près la même qu'en août; elle est donc nettement supérieure à celle du Pic en septembre.

e) *Variations de plusieurs jours de « période ».*

On peut aussi chercher s'il existe des intervalles de temps embrassant plusieurs jours consécutifs, où la moyenne de l'état hygrométrique reste constamment au-dessous ou au-dessus d'une certaine valeur. Autrement dit on peut établir un tableau des intervalles de sécheresse et des intervalles d'humidité.

Par exemple j'ai pris arbitrairement la valeur 50 de l'humidité relative pour limiter ces intervalles. J'ai relevé pour plusieurs années, du 16 juillet au 31 août, le nombre de jours successifs où l'humidité relative a été inférieure ou égale à 50, et le nombre de jours successifs où l'humidité relative a été supérieure à 50.

A titre d'exemple, je donne les séries ainsi obtenues pour les années 1932, 1933, 1934.

TABLEAU DONNANT LES NOMBRES DE JOURS SECS SUCCESSIFS ET LES NOMBRES DE JOURS HUMIDES SUCCESSIFS (CES DERNIERS SONT ENTRE PARENTHÈSES), DU 16 JUILLET AU 31 AOUT		
Pic du Midi . . . . .	1932	(8) 1 (9) 2 (2) 2 (2) 1 (5) 3 (12)
	1933	(1) 2 (4) 3 (5) 4 (1) 1 (12) 1 (13)
	1934	4 (6) 4 (2) 1 (3) 1 (9) 2 (10) 2 (3)
Bagnères-de-Bigorre . . .	1932	(32) 2 (13)
	1933	(10) 1 (29) 1 (6)
	1934	(20) 1 (10) 1 (15)

On remarque que le nombre d'intervalles secs est plus grand au Pic qu'à Bagnères : pour les trois années considérées il y a 16 intervalles secs au Pic pour 5 à Bagnères. En outre, la durée moyenne de ces intervalles secs est environ deux jours au Pic, alors qu'elle n'est qu'un jour environ à Bagnères.

Le nombre de fois où les intervalles secs ont duré au moins deux jours s'élève à 10 au Pic, et 1 à Bagnères, pour les trois années considérées.

On peut donc admettre qu'il y a une « période » plus longue au Pic qu'à Bagnères.

### 8. Les extrêmes du climat de montagne.

Nous avons déjà noté la grande amplitude des variations de l'état hygrométrique au cours d'une même journée.

Même en considérant seulement l'état hygrométrique moyen de chaque journée, on remarque des extrêmes beaucoup plus marqués au Pic qu'à Bagnères<sup>(15)</sup>. Les jours très secs ou très humides au Pic sont assez fréquents; ils sont beaucoup plus rares à Bagnères.

J'ai relevé pour l'intervalle 1929-1936 le nombre de jours très humides, en appelant jours très humides ceux où l'état hygrométrique moyen atteint ou dépasse 90%. Pour ce même intervalle, j'ai relevé le nombre de jours très secs, en considérant comme jours très secs ceux où l'état hygrométrique moyen est inférieur ou égal à 30%.

#### AU PIC DU MIDI.

##### *Jours très humides.*

En 8 ans (2.922 jours) il y a eu en tout 1.091 jours très humides (état hygrométrique moyen  $\geq$  90). Ils se répartissent en moyenne de la façon suivante :

Janvier .....	11
Février .....	12
Mars.....	13
Avril .....	12
Mai.....	12
Juin.....	10
Juillet .....	7
Août.....	6
Septembre.....	9
Octobre.....	12
Novembre.....	15
Décembre .....	15.

##### *Jours secs.*

Pour le même intervalle de 8 ans, il y a eu en tout 231 jours pour lesquels l'état hygrométrique n'a pas dépassé 30.

Ces jours secs se répartissent en moyenne de la façon suivante :

Janvier.....	6
Février .....	5

---

15. Cf. GAUSSEN, *loc. cit.*, pp. 145-146.

Mars.....	3	
Avril.....	1	
Mai.....	}	1 pour tout le trimestre,
Juin.....		
Juillet.....		
Août.....	2	
Septembre.....	1	
Octobre.....	3	
Novembre.....	3	
Décembre.....	4.	

#### A BAGNÈRES-DE-BIGORRE.

##### *Jours très humides.*

Pour les 2.922 jours considérés il n'y en a eu que 60 où l'état hygrométrique moyen n'a pas été inférieur à 90.

Les mois où se rencontrent ces jours très humides sont juillet, octobre, novembre, décembre (en moyenne 1 jour pour chacun de ces mois). Dans les autres mois on ne trouve pratiquement jamais de ces jours très humides.

##### *Jours secs.*

Les jours secs sont encore plus rares que les jours très humides. Pour le même intervalle de 2.922 jours il n'y a eu en tout que 14 jours où l'état hygrométrique moyen n'a pas été supérieur à 30.

On peut donc dire que pratiquement il n'existe pas de jours très secs à Bagnères.

Donc, même en ne considérant que les valeurs journalières moyennes, l'état hygrométrique en montagne présente des valeurs extrêmes très accusées.

#### 9. Résumé des observations précédentes.

a) On peut considérer les variations de l'humidité atmosphérique comme la résultante de trois variations élémentaires<sup>(16)</sup> : une variation de longue période, ou variation annuelle ; une variation diurne ; et enfin une variation secondaire à courte période. La superposition de ces trois variations permet de rendre compte de l'allure des courbes tracées par les enregistreurs.

Pour comparer l'humidité à haute altitude avec celle à basse altitude, au point de vue de l'action sur les plantes, il est commode de comparer successivement les trois variations élémentaires.

---

16. Je laisse de côté les variations à très longue période, portant sur un certain nombre d'années (périodes undécennales ou autres). De même je néglige les variations « instantanées », c'est-à-dire de très courte période, qui n'ont pas le temps d'agir sur les appareils et ne peuvent laisser de trace décelable sur les courbes d'enregistreurs.

b) *Variation annuelle.*

La variation annuelle est tout à fait irrégulière au Pic du Midi, à un tel point que l'on peut se demander si les moyennes portant sur les observations des années successives représentent quelque chose. Les écarts sont si considérables d'une année à l'autre que même l'allure générale des courbes est complètement différente...

Pour la station de Bagnères, les courbes de variation annuelle sont beaucoup plus régulières; les écarts en valeur absolue sont bien moins grands. Presque toujours la courbe garde la même allure d'une année à l'autre: l'humidité relative à Bagnères présente son minimum au printemps, croît en été et passe par son maximum en automne.

c) *Variation diurne.*

Au Pic la variation est peu régulière, avec des différences notables d'un jour à l'autre; les époques des maxima et des minima sont souvent décalées de plusieurs heures d'un jour au suivant. On peut cependant considérer qu'en général le minimum a lieu en moyenne vers 11 ou 12 heures, pendant toute l'année. Il se produit donc à une heure plus tardive que dans les Alpes.

Le maximum est souvent atteint dès l'après-midi.

L'amplitude des variations diurnes est considérable.

A Bagnères, la variation est beaucoup plus régulière; l'allure des courbes de deux jours consécutifs reste sensiblement la même.

Le minimum de l'état hygrométrique, qui a lieu après 11 heures en moyenne pour les mois d'hiver, est plus tardif pour les mois d'été (vers 13 à 14 heures en moyenne en août).

Le maximum se produit pendant la nuit: après minuit pendant le printemps et l'été; il est atteint dès le soir pour les mois plus froids. L'écart entre le maximum et le minimum d'une journée est beaucoup plus faible qu'au Pic.

d) *Variations de courte durée pendant les mois de juillet, août, septembre.*

Au Pic la période moyenne de ces variations est voisine d'un quart d'heure en juillet et août; elle est plus longue en septembre.

L'amplitude, très forte en juillet-août, devient plus faible en septembre, mois où l'état hygrométrique est souvent proche de la saturation.

A Bagnères, la période moyenne est voisine de 10 minutes, donc plus courte qu'au Pic.

L'amplitude, faible en juillet, augmente en août et reste à peu près la même en septembre. L'amplitude des variations de courte durée à Bagnères atteint celle du Pic en août et la dépasse en septembre<sup>(17)</sup>.

---

17. Mais à cette époque la croissance des plantes de montagne est terminée et leur structure est établie.

e) *Jours très secs et jours très humides.*

Les jours très humides sont fréquents au Pic; on en trouve même pendant les mois d'été. Les jours très secs sont assez fréquents; ils sont plus rares au printemps et en été.

A Bagnères au contraire les jours très humides sont rares, et les jours secs sont exceptionnels.

Le climat du Pic est donc bien un climat d'extrêmes.

L'étude de la répartition des jours secs et des jours humides montre qu'on trouve fréquemment au Pic, pendant les mois d'été, deux jours secs consécutifs alternant plus ou moins régulièrement avec des jours humides. On peut considérer que cela se rapproche des conditions des longues périodes de mes expériences. Nous verrons en effet, au chapitre x, que les longues périodes de sécheresse semblent avoir une importance beaucoup plus considérable que les périodes humides.

## CHAPITRE VII

### L'évaporation en montagne.

---

#### 1. Utilité d'envisager l'évaporation pour caractériser le climat de montagne.

La vitesse d'évaporation, comme nous l'avons déjà vu, dépend du déficit de saturation, mais elle dépend aussi de la pression atmosphérique. Toutes conditions égales d'ailleurs, elle augmente à mesure que la pression atmosphérique diminue.

Les mesures directes de l'évaporation sont très peu nombreuses; elles ne sont d'ailleurs pas toujours très précises; les résultats obtenus avec différents appareils ne sont en général pas comparables.

A la diminution de pression atmosphérique viennent s'ajouter la sécheresse de l'air qui se produit pendant le beau temps, l'augmentation de la radiation solaire, ainsi que la force plus grande des vents.

Il est d'observation courante que tout se dessèche rapidement aux grandes altitudes (\*). On considère généralement le climat alpin de nos régions comme très sec pour les végétaux (\*). Szymkiewicz (3) a soutenu l'opinion contraire que la transpiration des végétaux dans les montagnes de la zone tempérée était probablement plus faible que dans la plaine: son raisonnement semble applicable à l'étage montagnard et à l'étage subalpin, mais pas à l'étage alpin de nos régions.

#### 2. L'indice d'évaporation de Szymkiewicz.

En l'absence de données directes sur l'évaporation, nous pouvons arriver à l'évaluer si nous connaissons la valeur des divers facteurs qui la conditionnent. Il s'agit avant tout d'effectuer facilement les comparaisons entre les divers climats. La formule théorique représentant la quantité d'eau évaporée dans l'unité de temps, c'est-à-dire la vitesse d'évaporation est [Cf. chap. iv, formule (20)] :

$$m = \frac{H_0 T_2}{T_0 A d_1 d_2} \times \frac{d_1}{h} \times \frac{p_2 - p_1}{H - p_2},$$

---

1. HANN (J. VON), *Lehrbuch der Meteorologie*.

2. SCHRÖTER (C.), *Das Pflanzenleben der Alpen* (2<sup>e</sup> éd., 1923).

3. SZYMKIEWICZ (D.), *Études climatologiques II* (Acta Soc. Bot. Pol., Varsovie, 1923).

soit une constante multipliée par la quantité

$$i = (p_2 - p_1) \times \frac{273 + t_2}{273} \times \frac{760}{H - p_2},$$

où  $p_1$  représente la tension actuelle de la vapeur d'eau dans l'air ;

$p_2$  représente la tension maximum pour la température observée  $t_2$  (en degrés centésimaux) ;

H est la pression atmosphérique totalé ;

$p_1$ ,  $p_2$  et H sont exprimées en millimètres de mercure ;  $i$  s'exprime donc en millimètres de mercure.

Cette quantité  $i$  a été appelée *indice d'évaporation*.

Pour étudier les différences entre divers climats au point de vue de l'évaporation, il est utile de comparer les indices d'évaporation correspondants.

### 3. Autre expression de l'indice d'évaporation.

Nous avons par définition de l'indice d'évaporation

$$i = (p_2 - p_1) \times \frac{273 + t_2}{273} \times \frac{760}{H - p_2}.$$

Nous pouvons transformer cette expression de manière à la calculer plus facilement d'après les données des observations météorologiques.

Nous avons

$$p_2 - p_1 = d, \quad \text{déficit hygrométrique,}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = k, \quad \text{état hygrométrique,}$$

d'où

$$d = (1 - k) \times p_2,$$

$$i = (1 - k) p_2 \times \frac{273 + t_2}{273} \times \frac{760}{H - p_2},$$

$$i = 760 \times (1 - k) \times \left(1 + \frac{t_2}{273}\right) \times \frac{p_2}{H - p_2}.$$

### 4. Importance relative des différents termes pour le Pic du Midi et pour Bagnères-de-Bigorre.

Nous pouvons essayer d'évaluer l'importance des variations dues aux différents termes.

Le terme  $1 - k$  peut varier entre 0 et 1.

Pour le terme  $1 + \frac{t_2}{273}$  on remarquera d'abord que les températures maxima absolues relevées en 55 années au Pic et 38 années à Bagnères ont été  $22^\circ$  au Pic et  $37^\circ 9$  à Bagnères (\*).

Nous prendrons donc 22 comme valeur maximum pour  $t_2$  au Pic, ce qui nous donne la limite supérieure du terme  $1 + \frac{t_2}{273}$ ,

$$1 + \frac{t_2}{273} < 1,080.$$

Comme valeur limite inférieure pour  $t_2$  nous prendrons 0, bien que le minimum de  $t_2$  soit parfois au-dessous pour le trimestre considéré, car l'évaporation est alors très faible.

En définitive nous aurons au Pic

$$1 < 1 + \frac{t_2}{273} < 1,080.$$

Pour Bagnères, en admettant

$$0 < t_2 < 37,$$

nous aurons

$$1 < 1 + \frac{t_2}{273} < 1,135.$$

Reste le terme  $\frac{p_2}{H - p_2}$ . Nous venons de voir quelles étaient les valeurs limites supérieures de  $t_2$ ; nous avons donc les limites supérieures pour  $p_2$ . Comme limite inférieure pour  $p_2$  nous prendrons 0.

Pour  $H$ , au Pic, il reste voisin de 540, compris entre 525 et 551 environ en moyenne<sup>(3)</sup>. A Bagnères il est voisin de 710, compris entre 697 et 725, pour les mois de juillet, août, septembre.

4. Bulletin de l'Institut et Observatoire de Physique du Globe du Pic du Midi, *Météorologie* (1935-36), par M. TAULE.

5. Si nous considérons les valeurs de la moyenne journalière, nous trouvons pour valeurs extrêmes de la pression atmosphérique pour les trois mois considérés, et de 1929 à 1936 :

Au Pic, valeur maximum :  $551^{\text{mm}},1$  (29 août 1936);

— valeur minimum :  $533^{\text{mm}},3$  (21 septembre 1934).

A Bagnères, valeur maximum :  $724^{\text{mm}},3$  (4 juillet 1935);

— valeur minimum :  $705^{\text{mm}},7$  (24 août 1931).

Pour calculer la limite supérieure du terme  $\frac{p_2}{H - p_2}$ , il faudra prendre le minimum pour  $H$ . Nous trouvons ainsi

au Pic

$$0 < \frac{p_2}{H - p_2} < 0,040,$$

à Bagnères

$$0 < \frac{p_2}{H - p_2} < 0,065.$$

Si on suppose que tous les facteurs agissent au maximum et simultanément dans le même sens, on trouve :

au Pic  $0 < i < 32,8;$

à Bagnères  $0 < i < 52.$

Si l'on s'en tient à ce calcul on voit que l'évaporation peut être théoriquement plus forte à Bagnères qu'au Pic du Midi. En réalité les extrêmes de l'état hygrométrique sont moins marqués à Bagnères, ce qui fait que le terme  $(1 - k)$  y est pratiquement beaucoup plus faible. Il suffit que  $k$  atteigne 37 % pour que la valeur de  $i$  à Bagnères soit ramenée à être inférieure<sup>(6)</sup> à 32,8. D'autre part l'action des vents et de la radiation se fait sentir davantage en montagne. Finalement l'évaporation est souvent plus forte en montagne qu'en plaine.

##### 5. Conséquence : précision avec laquelle les différents termes devront être calculés.

Si nous considérons les divers termes et leur variation possible, le terme  $(1 - k)$  doit être évalué avec précision puisqu'il peut varier presque de 0 à 1.

Le terme  $\frac{p_2}{H - p_2}$  pouvant varier entre 0 et 0,065 doit être aussi évalué avec soin ; cependant si  $p_2$  doit être évalué avec précision, il n'en est pas de même pour  $H$  : il suffira de prendre la valeur moyenne de  $H$ <sup>(7)</sup>.

Enfin le terme  $\left(1 + \frac{t_2}{273}\right)$ , qui est compris entre 1 et 1,1, n'aura pas besoin d'être connu avec une grande approximation, puisque sa variation influera peu sur

6. On peut dire que c'est pratiquement toujours le cas. De 1929 à 1936, pour les mois de juillet, août, septembre, l'état hygrométrique moyen n'a été que 8 fois inférieur à 37.

7. En effet,  $H$  variant entre 525 et 551, par exemple, si nous prenons la moyenne 538, la limite supérieure de l'erreur que nous commettons est  $\frac{13}{538} = 0,025$ , soit 2,5 pour cent.

le résultat total. Nous pourrions donc, sans commettre d'erreur appréciable, prendre pour  $t_2$  la température maximum qui est en général presque atteinte pendant les heures les plus chaudes de la journée. Ce sont aussi ces heures qui en général correspondent à la plus faible humidité de l'air. Pour simplifier nous arrondirons au demi-degré inférieur les nombres donnés pour  $t_2$ .

Enfin l'examen détaillé des courbes enregistrées au Pic montre que pratiquement la saturation est atteinte chaque nuit; le minimum de l'indice d'évaporation au Pic est donc chaque jour voisin de 0. Nous n'aurons donc à calculer que le maximum de l'indice pour le Pic.

Il n'en sera pas de même pour Bagnères, la saturation étant souvent loin d'être atteinte, même pendant la nuit.

#### 6. Résultats relatifs au Pic du Midi et à Bagnères-de-Bigorre.

En utilisant les remarques précédentes, j'ai effectué le calcul de l'indice d'évaporation pour les deux stations considérées.

J'ai adopté pour H les valeurs suivantes :

Au Pic 544;

A Bagnères 715;

ce sont très sensiblement les moyennes de la pression atmosphérique en été (les valeurs exactes sont 543,6 et 715,4).

Dans un premier tableau, destiné à donner la valeur moyenne de l'indice d'évaporation  $i$  pour chaque saison, j'ai utilisé les données de l'Observatoire du Pic du Midi relatives aux saisons « normales »; j'ai pris pour  $t_2$  les températures maxima moyennes et pour  $k$  les valeurs de l'humidité moyenne. J'ai ainsi obtenu les résultats suivants :

VALEURS DE L'INDICE D'ÉVAPORATION AU PIC DU MIDI ET A BAGNÈRES-DE-BIGORRE (SAISONS « NORMALES »)						
	Pic			Bagnères		
	$t_2$	$k$	$i$	$t_2$	$k$	$i$
Printemps .....	0,2	0,71	2	15,3	0,67	5
Été.....	9,6	0,63	5,2	23	0,70	7,4
Automne .....	2,8	0,67	2,5	16,9	0,73	4,3

Comme c'est surtout pendant l'été que l'évaporation est intense et prend une importance capitale pour la végétation, j'ai trouvé utile de calculer l'indice d'évaporation moyen de l'été pour plusieurs années successives. Dans ce calcul, j'ai pris pour  $t_2$  la moyenne des températures maxima de l'été et pour  $k$  l'état hygrométrique moyen correspondant.

VALEURS DE L'INDICE D'ÉVAPORATION AU PIC DU MIDI ET A BAGNÈRES-DE-BIGORRE PENDANT L'ÉTÉ		
Année	Pic	Bagnères
1929.....	5,5	10,6
1930.....	4,0	9,3
1931.....	4,1	9,9
1932.....	2,4	7,0
1933.....	4,3	7,4
1934.....	4,1	8,6
1935.....	4,2	8,8
1936.....	3,2	9,0

On remarque que l'indice d'évaporation du Pic est inférieur à celui de Bagnères. Ce cas n'est pas exceptionnel. A titre de comparaison, je cite quelques valeurs données par Szymkiewicz et calculées mensuellement sur des moyennes pour l'intervalle 1895-1904.

MAXIMA MENSUELS MOYENS DE L'INDICE D'ÉVAPORATION D'APRÈS SZYMKIEWICZ				
Localité	Altitude	Juillet	Août	Septembre
Paris-Saint-Maur .....	49 <sup>m</sup>	14,6	13,5	9,8
Toulouse .....	194 <sup>m</sup>	17,0	16,0	11,9
Cracovie .....	220 <sup>m</sup>	11,9	11,0	8,0
Lyon-Saint-Genis-Laval .....	299 <sup>m</sup>	20,2	17,3	12,8
Schneekoppe .....	1.602 <sup>m</sup>	3,1	2,8	2,1
Sonnblick .....	3.100 <sup>m</sup>	1,5	1,5	1,5
Puy de Dôme (plaine) .....	388 <sup>m</sup>	17,0	15,9	12,4
Puy de Dôme (sommet) .....	1.467 <sup>m</sup>	4,7	4,7	3,4

Ce tableau montre que l'indice diminue en général quand l'altitude devient grande. Dans tous les résultats moyens précédents, l'indice de Bagnères était supérieur à celui du Pic pour l'intervalle de temps correspondant. On peut se demander si cela se produit constamment. Pour le vérifier, j'ai pris au hasard une année; j'ai calculé l'indice pour chaque jour séparément pour l'intervalle du 15 juillet au 31 août.

En prenant pour  $t_2$  la température maxima de la journée, arrondie au demi-degré inférieur, et pour  $k$  la valeur minima relevée sur les courbes, j'ai obtenu  $i_{\max}$ ; de même la température minima et le maximum de  $k$  m'ont donné  $i_{\min}$ .

Dates	Pic	Bagnères	Dates	Pic	Bagnères
15 juillet 1934.....	5,8	16,2	8 août 1934.....	4,2	14,1
16.....	10,5	19,8	9.....	4,6	11,6
17.....	15,3	25	10.....	7	10,1
18.....	15	5,7	11.....	7,3	9,2
19.....	13,5	5,7	12.....	5,8	7,9
20.....	12,3	18,1	13.....	4,5	8,5
21.....	5,4	19,8	14.....	5	10,1
22.....	2,6	14,9	15.....	12,4	14
23.....	2,3	12,8	16.....	9	21,5
24.....	5,7	12	17.....	7,4	23,6
25.....	9,4	12	18.....	7,1	21,1
26.....	16,2	10,7	19.....	8	14,5
27.....	13	9,9	20.....	2,2	13
28.....	13,4	11,6	21.....	2,1	15,5
29.....	12,7	13,7	22.....	7,5	13,2
30.....	10,3	30	23.....	6	12,7
31.....	2,9	12,7	24.....	2,3	10,8
1 <sup>er</sup> août 1934.....	11,7	17,5	25.....	0,6	3,9
2.....	3,2	11	26.....	5	14,6
3.....	0	6,2	27.....	11,4	18,5
4.....	5,5	10,5	28.....	9	14,5
5.....	10,8	23	29.....	2	7
6.....	4,7	11,6	30.....	3,2	10,1
7.....	5,3	11	31.....	0	8,2

Je n'ai reporté sur le tableau ci-dessus que la valeur de l'indice d'évaporation maximum. L'indice minimum est très faible au Pic : il est presque constamment nul en septembre; quelques jours en juillet donnent des valeurs comprises entre 1 et 3, mais ce sont des exceptions. L'indice minimum à Bagnères est toujours voisin de 2 ou 3; exceptionnellement il arrive presque à 5.

L'examen du tableau montre que sur 48 jours, l'indice maximum de Bagnères a été supérieur à l'indice maximum du Pic 43 fois. On trouve le même résultat pour la différence entre l'indice maximum et l'indice minimum d'un même jour.

On peut donc dire qu'en général, pour l'intervalle de temps considéré, l'indice d'évaporation à Bagnères est supérieur à l'indice d'évaporation au Pic.

Mais l'évaporation, et la transpiration des plantes, dépendent aussi d'autres facteurs. Nous allons, dans les paragraphes suivants, essayer d'évaluer l'ordre de grandeur de leur influence sur l'évaporation.

Nous verrons si cette influence est susceptible d'inverser le sens de l'inégalité que nous avons trouvée entre Bagnères et le Pic du Midi.

### 7. Autres facteurs à considérer.

Il est possible d'imaginer a priori le sens dans lequel doivent varier les divers facteurs<sup>(8)</sup>.

Le fait essentiel, lorsque l'altitude augmente, est la diminution de la couche d'air qui se trouve au-dessus du point considéré; on en déduit immédiatement un certain nombre de conséquences.

a) La diminution de cette couche d'air entraîne nécessairement la diminution de la pression atmosphérique. Nous y avons déjà fait allusion (chap. vi, § 5).

b) La couche d'air étant moins épaisse et moins dense, l'air absorbera moins de chaleur solaire; il s'échauffera moins, mais inversement il cédera moins de chaleur, d'où abaissement de la moyenne de la température annuelle de l'air, et atténuation de ses oscillations par rapport à la moyenne.

c) Les rayonnements sont moins absorbés par l'air, donc l'insolation du sol, ainsi que la radiation terrestre, augmentent. Il s'ensuit de brusques et fortes oscillations de la température du sol; cela explique aussi le contraste marqué entre les pentes plus ou moins ensoleillées.

d) Si l'air renferme la même quantité de vapeur d'eau, l'abaissement de sa température augmente l'humidité relative. Il en résulte que jusqu'à une certaine altitude les montagnes sont en général plus nébuleuses et plus pluvieuses que les plaines.

Nous avons, au chapitre précédent, examiné les variations de cette humidité relative dans les Alpes et les Pyrénées.

e) Mais l'humidité absolue de l'air n'est pas constante; elle décroît quand l'altitude augmente, ce qui explique que, pour les grandes altitudes, on remarque une diminution de l'humidité relative.

f) Une autre conséquence du contraste thermique est l'action de la montagne

---

8. Cf. MARTONNE (E. DE). *Traité de Géographie physique* (4<sup>e</sup> éd., Paris, 1925).

sur le régime des vents (en plus du rôle d'obstacle mécanique joué par les montagnes). On peut citer les vents de montagne et de vallée. D'autres vents, sans être dus à la montagne, sont modifiés par elle.

Tous ces facteurs secondaires de l'altitude agissent à leur tour sur l'évaporation et sur la transpiration des plantes.

Nous avons déjà tenu compte de la pression atmosphérique, de la température de l'air et de son humidité, lorsque nous avons calculé l'indice d'évaporation. Je parlerai très rapidement des variations de ces facteurs, ce qui me permettra de généraliser les résultats obtenus. J'insisterai surtout sur les radiations, car je suis arrivé à la conclusion qu'elles constituent un des facteurs prépondérants de l'oromorphose.

Je comparerai rapidement les conclusions obtenues avec quelques résultats de mesures directes d'évaporation (§ 12).

### 8. La pression atmosphérique, la température et l'humidité de l'air en fonction de l'altitude.

La diminution de la pression atmosphérique est parfaitement connue. Les variations irrégulières diminuent, mais la variation annuelle augmente à mesure que l'altitude augmente. Au point de vue phytobiologique, nous avons vu au § 5 de ce chapitre, qu'il suffisait de considérer la valeur moyenne de cette pression au lieu considéré, les variations ayant peu d'influence sur l'évaporation.

La température de l'air diminue à mesure que l'altitude augmente. La loi de cette diminution varie notablement avec les conditions locales et en particulier les conditions topographiques. On peut admettre (°) comme variation moyenne :

1°	pour	180 <sup>m</sup>	de différence d'altitude en montagne;
1°	—	200 <sup>m</sup>	— — — sur les collines;
1°	—	250 <sup>m</sup>	— — — sur les plateaux.

L'abaissement est en général plus rapide pour les pentes raides et les versants tournés au sud.

La règle de l'abaissement de 1° pour 180<sup>m</sup> est bien vérifiée pour le Pic du Midi et Bagnères-de-Bigorre. La moyenne annuelle est : — 1°,9 au Pic, + 10°,6 à Bagnères, soit une différence de 12°,5. La différence des altitudes est 2.294<sup>m</sup>, ce qui donne une variation de 1° pour  $\frac{2.294}{12,5} = 183^m$ .

La variation diurne est plus faible en hiver, plus forte en été sur les montagnes; elle s'atténue si l'altitude augmente.

---

9. HANN (J. VON), *Lehrbuch der Meteorologie* [4<sup>e</sup> éd. revue par Süring (R.), 1926].

L'humidité absolue comme nous l'avons déjà vu (§ 5, chap. vi) diminue quand l'altitude devient plus forte.

Pour donner une idée des variations de ces trois facteurs, d'une façon en quelque sorte indépendante du relief local, je donne un tableau de valeurs obtenues par ballons-sonde. Comme il s'agit avant tout de donner l'allure générale des phénomènes, j'arrondis les nombres donnés par Humphreys<sup>(10)</sup> et qui représentaient les moyennes de nombreuses observations.

EN ÉTÉ.

Altitude (mètres)	Pression atmosphérique (mm. de mercure)	Température de l'air (degrés centésimaux)	Pression de la vapeur d'eau (mm. de mercure)
0	763	14,8	10,5
500	719	13,6	9,2
1.000	677	11,8	7,8
1.500	638	9,0	6,2
2.000	600	6,3	5,0
2.500	565	3,6	4,0
3.000	531	1,0	3,1
4.000	468	-4,3	1,9
5.000	412	-9,9	1,0

Je n'ai donné que les moyennes d'été puisque ce sont les seules qui nous intéressent pour la croissance des plantes.

### 9. L'insolation; le rayonnement terrestre; la température du sol.

a) La valeur moyenne de l'émission de radiation solaire est évaluée<sup>(11)</sup>, pour l'intervalle 1905-1926, à 1,94 calories-gramme par centimètre carré et par minute, à moins de 1% près. Ce serait la quantité de chaleur arrivant sur une surface de 1<sup>cm²</sup>, normale aux rayons et située à la limite extérieure de l'atmosphère.

Elle semble varier, avec une amplitude de 2 %, en liaison avec les taches solaires.

En un point du sol, on mesure l'énergie reçue sur une surface horizontale : il faut donc tenir compte de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon du lieu (c'est-à-dire de la latitude, de la déclinaison et de l'angle horaire). Des tables ont été publiées par Davis<sup>(12)</sup>, par Abbot<sup>(13)</sup>, par Angot<sup>(14)</sup>.

10. HUMPHREYS (W.-J.), *Physics of the air* (2<sup>e</sup> éd., New-York and London, 1929).

11. HUMPHREYS, *loc. cit.*

12. DAVIS, *Elementary Meteorology*.

13. ABBOT (C.-G.), (Beiträge zur Geophysik, XVI, 1927).

14. ANGOT (A.), (Ann. Bur. cent. météor., I, 1883).

De l'énergie ainsi envoyée par le Soleil, une partie est renvoyée dans l'espace par les nuages, une autre partie est diffusée.

L'absorption due à l'air est d'autant plus intense que la couche d'air (et surtout de vapeur d'eau) est plus épaisse. Il y aura donc une augmentation de l'intensité de la *radiation totale* à mesure qu'on s'élève. On a une indication approximative par la différence des températures au soleil et à l'ombre de thermomètres à réservoir noirci et placé dans le vide. Des mesures comparatives ont été effectuées à l'aide de cet actinomètre à Bagnères-de-Bigorre et au Pic du Midi de 1902 à 1911. Les moyennes mensuelles<sup>(15)</sup> des observations faites à midi ont été, en degrés :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Bagnères, 547 <sup>m</sup> .....	6,6	6,7	7,5	7,5	7,1	6,7	7,4	7,3	7,0	6,6	5,8	5,1
Pic du Midi, 2.877 <sup>m</sup> .	12,8	14,6	16,3	17,2	16,9	14,1	13,2	12,7	12,1	12,2	12,1	11,8

On observe à Bagnères un maximum en mars-avril et un autre en juillet-août ; l'intensité de la radiation totale est relativement plus faible en juin.

Au Pic on ne trouve qu'un maximum, très net, en avril-mai, mais dans tous les cas l'intensité de la radiation est plus forte au Pic qu'à Bagnères.

Il est difficile de donner des valeurs absolues du rayonnement, les mesures des divers auteurs n'étant pas toujours comparables.

En rapportant les mesures de Violle et Margottet (août 1875) à la même hauteur du Soleil, et en prenant pour unité l'intensité du rayonnement à Paris, on a le tableau :

	Paris	Glacier des Bossons	Grands Mulets	Sommet du Mont Blanc
Altitudes.....		1.200 <sup>m</sup>	3.050 <sup>m</sup>	4.810 <sup>m</sup>
Intensité de radiation.	1	1,06	1,19	1,26

Les mesures d'Angström au pic de Ténériffe (juillet 1896) montrent une variation du même ordre de grandeur. En passant de 360<sup>m</sup> à 3.680<sup>m</sup> d'altitude, l'intensité du rayonnement solaire total augmente de 18 %.

Götz<sup>(16)</sup> a classé un certain nombre de stations par intensité d'insolation décroissante. Il a trouvé ainsi les résultats suivants, pour le 15 juin :

15. DORT (J.), *Notice météorologique sur Bagnères-de-Bigorre basée sur 35 années d'observations ininterrompues* (Bull. Soc. Ramond, 1939).

16. GÖTZ (F.-W.-P.), *Das Strahlungsklima von Arosa* (1926).

Station	Altitude
Arosa.....	1.860 <sup>m</sup>
Davos.....	1.600 <sup>m</sup>
Saint-Blasien (Forêt-Noire)...	796 <sup>m</sup>
Agra (Tessin).....	550 <sup>m</sup>
Postdam.....	106 <sup>m</sup>
Kolberg.....	5 <sup>m</sup>
Varsovie.....	130 <sup>m</sup>

(Le classement pour le 15 décembre est identique sauf une permutation entre Agra et Saint-Blasien). Les valeurs trouvées sont très voisines les unes des autres. Le 15 juin vers midi pour toutes les stations on trouve plus de 1,1 calorie par cm<sup>2</sup> et par minute. Le maximum est 1,5 cal./cm<sup>2</sup> et min. pour Arosa. En hiver la différence est beaucoup plus marquée entre les stations élevées (Arosa, plus de 1,4; Saint-Blasien, 1,2) et les stations de basse altitude (Postdam, en janvier, 1,05; Varsovie, 0,83 seulement).

Donc le classement obtenu est en bon accord avec ce qu'on pouvait prévoir.

Pour les Pyrénées, nous avons des résultats récents; Chouard<sup>(17)</sup> a effectué des mesures actinométriques dans le massif du Néouvielle. Il a mesuré la valeur instantanée du rayonnement à l'aide d'un pyréliomètre à pile thermoélectrique. Le rayonnement, exprimé en petites calories par cm<sup>2</sup> et par minute, pour une surface normale aux rayons, en juillet et août, de 1933 à 1936, entre 10 et 15 heures, par ciel très pur, était en général le suivant :

Station	Altitude	Intensité du rayonnement
Fabian.....	1.100 <sup>m</sup>	1,50
Orédon.....	1.850 <sup>m</sup>	1,65

A titre comparatif la valeur obtenue à Paris est voisine de 1,40.

Chouard a également effectué des mesures totalisatrices, à l'aide d'actinomètres de Bellani, à distillation d'alcool; la quantité d'alcool distillé dans l'intervalle de temps séparant deux lectures permet d'évaluer le nombre total de calories reçues par 1 cm<sup>2</sup> du sol dans cet intervalle.

Les résultats d'observations simultanées, pour l'intervalle du 20 juillet au 14 août 1934, ont été :

---

17. CHOUARD (P.), *Le rayonnement solaire et ses rapports avec la végétation dans le massif pyrénéen de Néouvielle* (Mélanges scientifiques offerts à M. Luc Picart. Public. Univ., Bordeaux, n° 2).

Station	Altitude	Énergie totale reçue (calories par cm <sup>2</sup> )
Fabian .....	1.100 <sup>m</sup>	13 300
Barèges (Lienz).....	1.600 <sup>m</sup>	17 200
Orédon .....	1.850 <sup>m</sup>	14 600
Aumar .....	2.200 <sup>m</sup>	17 650

Il faut remarquer que la station d'Orédon est très encaissée; l'actinomètre y est privé d'environ trois heures d'insolation le matin, et autant le soir : cela explique la valeur anormalement faible correspondante. (Nous reviendrons sur l'influence de la durée d'insolation.)

On peut donc dire que les Pyrénées obéissent à la règle générale : augmentation du rayonnement solaire avec l'altitude.

b) L'intensité totale du rayonnement solaire n'est pas seule à considérer. En effet la répartition des radiations varie : le *rayonnement ultra-violet* est plus intense aux grandes altitudes. Cela est d'une haute importance pour la végétation, puisque ce rayonnement joue un rôle morphogène considérable, au moins au début du développement des organes des plantes.

Vers 4.800<sup>m</sup>, pour une hauteur du Soleil de 30°, l'intensité de la partie la plus réfrangible du spectre (intensité chimique du rayonnement) est le double de ce qu'elle est au niveau de la mer, pour la même hauteur du Soleil.

Je me contente de donner un tableau d'après les mesures et calculs de Bunsen et Roscoe :

INTENSITÉ DU RAYONNEMENT ULTRAVIOLET EXPRIMÉE EN % DU MAXIMUM (C'EST-A-DIRE DE L'INTENSITÉ SUPPOSÉE MESURÉE A LA LIMITE DE L'ATMOSPHÈRE)					
Pression atmosphérique (en mm.)	Altitude (en mètres) environ	Intensité du rayonnement pour une hauteur du soleil de :			
		90°	70°	50°	30°
750	130	44	42	34	19
650	1.270	49	47	39	24
550	2.600	55	53	46	30
450	4.200	61	59	53	37
350	6.200	68	67	61	46

e) *Rayonnement du ciel.*

La lumière diffuse renvoyée par la couche supérieure de l'atmosphère diminue à mesure que l'altitude augmente. La luminosité générale du ciel diminue.

La diminution de la radiation diffuse est beaucoup moins importante que l'augmentation du rayonnement direct.

Je donne à titre d'indication les résultats obtenus par Samec<sup>(18)</sup> pour l'intensité chimique, par ascension en ballon.

Altitude	450 <sup>m</sup>	1.200 <sup>m</sup>	1.500 <sup>m</sup>	2.000 <sup>m</sup>	2.500 <sup>m</sup>	3.000 <sup>m</sup>	3.500 <sup>m</sup>	4.200 <sup>m</sup>
Lumière totale.....	1,73	1,77	1,82	1,90	2,01	2,09	2,12	2,30
Lumière du Soleil seule...	1,28	1,34	1,42	1,51	1,63	1,71	1,77	1,96
Lumière diffuse du ciel seule.	0,45	0,43	0,40	0,39	0,38	0,38	0,35	0,34

d) *Insolation et exposition.*

Les mesures d'insolation sont généralement rapportées à une surface normale aux rayons.

La pente et l'orientation ont une influence capitale : elles interviennent pour créer le contraste entre les flancs d'une même montagne, entre les versants d'une même vallée.

Je n'insiste pas sur ce sujet qui a été étudié par de nombreux auteurs.

e) *Durée d'insolation.*

La valeur de l'intensité ne suffit pas : il faut encore tenir compte du temps pendant lequel le Soleil brille. Les nuages modifient la durée d'insolation théorique.

On mesure la durée effective d'insolation avec des héliographes de divers principes : carbonisation d'une bande de carton (Campbell), impression d'un papier sensible au ferroproussiate (Jordan). On représente souvent les résultats par la fraction d'insolation, c'est-à-dire le quotient du temps pendant lequel le Soleil a brillé par le temps pendant lequel il est resté au-dessus de l'horizon du lieu considéré. Les observatoires donnent cette fraction d'insolation calculée par jour ou par mois.

J'extraits quelques valeurs numériques d'un tableau de Brockmann-Jerosch pour les Alpes<sup>(19)</sup>.

18. SAMEC (Wien. Sitzungb., CXVI, 1907).

19. BROCKMANN-JEROSCH (H.), *Die Vegetation der Schweiz*. Lieferung 2 (Bern, 1927).

	Altitudes (mètres)	DURÉES TOTALES D'INSOLATION (HEURES)				VALEURS DE LA FRACTION D'INSOLATION %			
		Juillet	Août	Sept.	Année	Juillet	Août	Sept.	Année
Bâle.....	277	222	223	168	1.681	50	55	49	41
Zurich.....	493	236	242	181	1.733	53	56	50	41
<i>Préalpes du N. :</i>									
Sântis.....	2.500	163	184	163	1.754	34	42	43	39
<i>Alpes centrales :</i>									
Davos.....	1.561	205	212	174	1.813	55	58	57	53
Arosa.....	1.860	197	214	172	1.827	47	56	54	50
<i>Vallées S. des Alpes :</i>									
Lugano.....	276	290	276	214	2.276	69	68	61	57

Les mesures ont été effectuées au Pic du Midi pendant un certain nombre d'années. Je relève par exemple les résultats suivants :

		DURÉES TOTALES D'INSOLATION (HEURES)			VALEURS (%) DE LA FRACTION D'INSOLATION		
		Juillet	Août	Sept.	Juillet	Août	Sept.
Pic du Midi...	Année 1927.	269	270	163	58	63	43
	Année 1928.	279	324	234	60	75	51

On voit que pour la région des Alpes, aux basses altitudes, la durée totale d'insolation est maxima en juillet; pour les altitudes plus grandes, le maximum a lieu en août, dans les Préalpes comme dans les Alpes centrales. Les résultats du Pic du Midi sont, à ce point de vue, comparables avec les grandes altitudes des Alpes.

La fraction d'insolation passe par son maximum en août pour les basses altitudes de la région des Alpes (sauf pour les vallées sud, où le maximum, plus précoce, se produit en juillet-août). Pour les hautes Alpes il tend au contraire à se retarder vers septembre. Dans les Préalpes du nord, il s'attarde jusqu'en novembre.

Le Pic du Midi s'écarte donc de la règle des Alpes au point de vue de l'époque du maximum de la fraction d'insolation.

Comme dernière remarque, la durée totale d'insolation au Pic est plus grande que pour les stations données (dont l'altitude est plus faible).

f) *Température du sol.*

La considération de la température de l'air ne suffit pas pour caractériser le régime thermique des montagnes.

L'échauffement du sol dû à la radiation plus intense agit beaucoup sur la végétation et permet son développement malgré les basses températures de l'air.

Des observations simultanées, à Bagnères et au Pic du Midi, en septembre, dans des sols analogues (terreau noir de vieux troncs de saules) et à faible profondeur, ont donné les résultats suivants :

VALEURS MOYENNES				
Station	Altitude	Température de l'air	Température du sol près de la surface	Différence
Bagnères.....	551 <sup>m</sup>	22°,3	36°,1	13°,8
Pic.....	2.877 <sup>m</sup>	10°,1	33°,8	23°,7
VALEURS MAXIMA ABSOLUES				
Station	Heure	Température de l'air	Température du sol	Différence
Bagnères.....	14 <sup>h</sup>	27°,1	50°,3	23°,2
Pic.....	11 <sup>h</sup> 1/2	13°,2	52°,3	39°,1

Il faut remarquer l'heure du maximum au Pic : cela est dû au fait qu'en septembre le Pic se couvre de nuages vers midi. Il faut noter aussi qu'en juillet-août on relèverait des écarts plus importants encore.

L'excès de la température du sol sur la température de l'air augmente avec l'altitude. C'est peut-être là un des facteurs les plus importants au point de vue de la biologie des plantes. Il arrive fréquemment que la température à l'intérieur d'une touffe de plante excède de beaucoup la température de l'air. Brockmann-Jerosch affirme que la température des plantes des Alpes, tant qu'elles ne sont pas couvertes de neige, peut surpasser de 40° à 50° celle de l'air à l'ombre.

Je cite quelques résultats obtenus par H. Devaux<sup>(20)</sup> en août 1920 au sommet du Pic du Midi ; je donne seulement des relevés du début de l'après-midi.

20. DEVAUX (H.). *L'échauffement de la surface du sol par le rayonnement solaire au sommet du Pic du Midi et dans les plaines tempérées ou tropicales* (Mélanges scientif. offerts à M. Luc Picart. Publ. Univ., Bordeaux).

Température de l'air	TEMPÉRATURE A L'INTÉRIEUR D'UNE PETITE TOUFFE DE :		
	Festuca	Nardus	Serpolet
14,7	39,1	37,3	41
12,0	34,4	32,7	
10,3	35	31,5	
11,4	38,2	31,5	

De même Chouard<sup>(21)</sup> indique que la surface du sol des pelouses d'Orédon (1.860<sup>m</sup>) et d'Aumar (2.200<sup>m</sup>) atteint souvent 42° à 50° sous la pénombre des herbes, vers 14 heures, au soleil.

La température du sol réagit dans une certaine mesure sur celle de l'air; au voisinage d'objets ensoleillés la température de l'air peut surpasser de 7° à 15° celle de l'air à l'ombre. Les plantes appliquées sur le sol bénéficient dans la journée d'une température élevée.

g) Le rayonnement du sol est beaucoup plus intense à mesure que l'altitude augmente. Cela explique les grandes oscillations diurnes de la température du sol.

Le rayonnement du sol augmente plus rapidement que l'insolation. En effet reprenons l'exemple donné par Hann.

INTENSITÉ DU RAYONNEMENT DU SOL EN CALORIES GRAMME PAR CM <sup>2</sup> ET PAR MINUTE					
	Vienne	Zürich	Rauris	Sonnblick	
Altitude.....	202 <sup>m</sup>	440 <sup>m</sup>	950 <sup>m</sup>	3.104 <sup>m</sup>	
Rayonnement.....	0,15	0,13	0,15	Février 0,20	Juillet 0,19

Ce rayonnement est environ le dixième du rayonnement solaire maximum à midi les jours parfaitement clairs. De 300 à 3.100<sup>m</sup> il augmente de 40 % de sa valeur (dans les mêmes conditions, le rayonnement solaire augmente d'environ 20 %).

Il faut noter que ce rayonnement terrestre se produit jour et nuit, tandis que le rayonnement solaire n'a lieu que le jour, ce qui explique la basse température des montagnes.

21. CHOUARD (P.), *loc. cit.*

Comme exemple d'oscillations diurnes de la température du sol, je citerai simplement les températures relevées par Hington<sup>(22)</sup> le 20 mai 1924 au Tibet, à 4.500<sup>m</sup> d'altitude.

	Maximum	Minimum	Différence
Température du sable . . . . .	+ 35°	— 16°	51°
Température de l'air . . . . .	+ 13°	— 11°	24°

Une conséquence immédiate, et qui a son importance pour la formation des sols, de ces variations de température est la rapide fragmentation des roches en montagne : celles-ci, soumises à des dilatations et des contractions incessantes et considérables, s'effritent.

Contre les effets du rayonnement, l'humidité de l'air joue un grand rôle, surtout s'il y a condensation : celle-ci produit un réchauffement notable de la température (action de la rosée) qui protège dans une certaine mesure les plantes contre un refroidissement nocturne considérable.

Les nuages aussi s'opposent au rayonnement ; Dorno, pour Davos, a établi la diminution pour cent du rayonnement par certaines nébulosités et certaines sortes de nuages. Je cite ses résultats :

DIMINUTION % DU RAYONNEMENT				
Nébulosité	Cirro-Stratus	Alto-Stratus	Strato-cumulus	Nimbus
5	16	33	45	52
10	30	60	80	94

Ils montrent la grande influence des nuages : l'insolation est réduite, mais moins que le rayonnement terrestre.

#### 10. La nébulosité et les précipitations en montagne.

a) Lorsqu'un courant atmosphérique rencontre un obstacle, même faible, il est obligé de s'élever. En s'élevant, cet air passe à une pression moindre ; la détente le refroidit (par exemple une diminution de la pression d'un dixième de sa valeur peut abaisser la température de l'air de 9°). Il peut y avoir aussi refroidissement par conductibilité thermique.

22. In NORTON (E.-F.), *La dernière expédition au Mont Everest* (trad. par G. Léon, Paris, 1927).

L'air se refroidissant, son humidité relative augmente. Il est normal que des condensations de vapeur d'eau se produisent, ce qui explique la pluviosité généralement plus grande sur les montagnes qu'en plaine. En réalité, cela n'est pas aussi simple; l'augmentation de l'humidité et de la nébulosité avec l'altitude est une règle souffrant de nombreuses exceptions. L'influence des conditions locales est prépondérante.

Il faut aussi remarquer l'extrême variabilité des conditions d'humidité. L'humidité atmosphérique absolue, par temps calme, diminue à mesure qu'on s'élève (dans les limites qui nous intéressent, on peut admettre qu'elle tombe à la moitié de sa valeur pour une différence d'altitude de 2.000<sup>m</sup>); cela explique l'impression de sécheresse si souvent ressentie sur les hauteurs. Mais la moindre bouffée d'air ascendant suffit pour amener le brouillard.

L'humidité relative varie rapidement dans de larges limites, en un même lieu, et d'un versant à l'autre de la même montagne.

b) La *nébulosité moyenne* est très variable suivant les saisons.

Dans les Alpes, jusqu'à un certain niveau, elle est généralement plus forte en été qu'en hiver, au contraire de ce qui se passe en plaine.

Hann cite les moyennes de nombreux observatoires.

NÉBULOSITÉ MOYENNE						
	Altitude moyenne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année
Plaine suisse....	420 <sup>m</sup>	7,3	5,8	5,2	6,2	6,1
Vallées du Tyrol.	1.300 <sup>m</sup>	4,6	5,8	5,4	5,2	5,2
Haut-Tyrol.....	1.800 <sup>m</sup>	3,7	4,6	5,0	4,2	4,4

Mais ces moyennes, comme toutes les moyennes climatologiques, ne donnent qu'une idée incomplète des phénomènes.

Il y a un autre fait qui montre mieux l'allure de la nébulosité. Les nuages forment une couche d'épaisseur plus ou moins grande; pour simplifier on peut admettre que cette couche a un à deux kilomètres de hauteur. Mais elle monte ou descend suivant la saison, par suite des variations de l'humidité absolue et de la température.

La couche nébuleuse est plus basse en hiver, ce qui explique le dégagement des hauts sommets ensoleillés au-dessus de la mer des nuages. Au printemps, elle s'élève, pour arriver vers 3.000<sup>m</sup> en moyenne en été. Les courants atmosphériques

peuvent modifier dans une certaine mesure ces données générales. Par exemple, les changements de direction du vent font varier fortement la nébulosité : la brise de vallée rassemble les cumulus sur les hauteurs ; la brise de montagne les dissipe dès qu'elle se met à souffler.

c) La quantité et le nombre des précipitations sont augmentées jusqu'à une certaine altitude. L'augmentation de précipitations se fait sentir progressivement dès qu'on approche de la montagne ; elle est plus sensible du côté d'où soufflent les vents pluvieux.

L'augmentation relative, pour deux stations données, à des altitudes différentes, n'est pas la même suivant les saisons. Je cite un extrait d'un tableau de Hann donnant, par saisons, les rapports des précipitations tombées pour deux stations ; j'ai simplement recalculé les moyennes relatives au rapport des précipitations du Pic du Midi à celles de Bagnères-de-Bigorre.

## RAPPORTS DES PRÉCIPITATIONS

Localités	Latitude moyenne	Différence d'altitude	Hiver	Printemps	Été	Au-tomme	Année
<i>Pic du Midi :</i> Bagnères .....	43°	2.300 <sup>m</sup>	1,48	1,13	0,92	1,05	1,16
<i>Pic du Midi :</i> Arreau .....	43°	2.160 <sup>m</sup>	2,35	2,04	0,98	1,36	1,62
<i>Sonnblick :</i> Bucheiben .....	47°,1	1.900 <sup>m</sup>	2,12	1,78	0,88	1,12	1,29
<i>Sonnblick :</i> Döllach, Winklern ...	46°,9	2.170 <sup>m</sup>	2,52	3,08	1,44	1,35	1,86
<i>Remarques :</i> Bagnères se trouve du côté du vent (Luvseite) ; Arreau se trouve du côté sous le vent (Leeseite) ; Bucheiben est situé au nord ; Döllach et Winklern au sud.							

Dans nos régions on peut dire que l'augmentation des précipitations avec l'altitude est marquée en hiver et au printemps ; elle est la plus faible en été et en automne.

Si nous considérons les valeurs absolues des précipitations, nous avons d'après les moyennes fournies par l'Observatoire du Pic du Midi (moyennes de 55 années pour le Pic, et de 38 années pour Bagnères).

## PRÉCIPITATIONS TOTALES (EN MM.)

	Altitude	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année
Pic .....	2.859 <sup>m</sup>	524	476	257	376	1.631
Bagnères.....	565 <sup>m</sup>	353	420	278	356	1.405

On voit que le maximum absolu a lieu au Pic en hiver, alors qu'à Bagnères il a lieu au printemps. Ces deux stations présentent le minimum en été.

d) *La loi du maximum en montagne.*

En réalité l'augmentation avec l'altitude n'est pas absolument régulière.

Gausсен<sup>(23)</sup> a étudié la pluviosité sur le versant nord des Pyrénées, en faisant la moyenne de toutes les stations comprises dans des tranches de 200<sup>m</sup> en altitude. Il a obtenu une courbe montrant une augmentation régulière jusque vers 1.600<sup>m</sup>, puis une diminution assez nette; l'augmentation reprend au-dessus de 2.000<sup>m</sup>. Cet auteur<sup>(24)</sup> explique le maximum relatif par une particularité topographique des Pyrénées : la pente est forte jusqu'à 1.600<sup>m</sup> à 1.800<sup>m</sup>, puis plus douce jusque vers 2.200<sup>m</sup>; au-dessus elle redevient plus forte.

On retrouve des phénomènes analogues pour la pluviosité dans les Alpes. Je donne l'énoncé de Gausсен : au moins dans les Pyrénées, « les précipitations croissent jusqu'à une altitude  $a$ ; au-dessus elles décroissent. Dans les massifs élevés et non isolés existe un second maximum très supérieur au premier, pour une altitude  $A$  qui peut être très élevée ».

Dans le cas du Pic du Midi, montagne périphérique isolée, on ne peut observer que le premier maximum, correspondant à  $a$ .

Les valeurs de  $a$  et  $A$  sont plus élevées sur les montagnes des régions arides que sur celles des régions humides. Elles dépendent de l'orientation du versant considéré, par rapport aux vents humides ou aux vents dominants; dans la plupart des chaînes on peut distinguer un versant pluvieux et un versant sec.

La valeur de  $a$  semble plus grande en été qu'en hiver; nous avons vu que la couche de nébulosité maximum est plus élevée en été. Pour le Pic du Midi, Supan estime que la plus grande quantité de précipitations tombe vers 1.900<sup>m</sup> au semestre d'été, et vers 1.300<sup>m</sup> au semestre d'hiver. Je reproduis un tableau de Supan qui montre l'existence du premier maximum; la quantité des précipitations à Tarbes est prise pour unité.

23. GAUSSEN (H.), *Les précipitations annuelles en France* (Ann. de Géogr., XLIV, 1935).

24. Voir aussi : GAUSSEN (H.), *La pluviosité pyrénéenne aux altitudes élevées* (Congrès intern. d'alpinisme, Chamonix-Mont Blanc, 1932, Club Alpin Français, Paris).

MOYENNE RELATIVE DES PRÉCIPITATIONS				
Stations .....	Tarbes	Bagnères	Plantade	Pic
Altitude .....	308 <sup>m</sup>	555 <sup>m</sup>	2.366 <sup>m</sup>	2.860 <sup>m</sup>
Semestre d'hiver ..	1	1,76	2,73	2,67
Semestre d'été ....	1	1,39	2,45	1,38
Année.....	1	1,55	2,57	1,94

Mais il faut remarquer que la différence de pluviosité totale entre la montagne et la plaine provient surtout des chutes de neige en hiver et au printemps ; l'été la pluviosité ne paraît pas très différente entre la montagne et la vallée<sup>(25)</sup> : or c'est l'époque qui nous intéresse pour la végétation.

La pluviosité et l'humidité très grandes aux altitudes moyennes forment contraste avec la sécheresse en été des hautes cimes. Cette opposition se traduit, pour la végétation, par les associations plutôt xérophiles de l'étage alpin, contrastant avec les associations dendrophiles. D'après ce que nous venons de voir, on conçoit que la limite entre l'étage alpin et l'étage subalpin soit plus basse pour les montagnes de la périphérie que pour les montagnes du centre de la chaîne.

#### 11. Le vent en montagne.

L'étude de la circulation générale des vents montre que pour les latitudes supérieures à 32° les vents ont tendance à présenter une composante ouest. Ils peuvent être modifiés considérablement par les conditions locales (par exemple brise de montagne et brise de vallée).

Je laisse de côté l'étude de la direction des vents, qui dépend des conditions topographiques et peut varier d'une montagne à l'autre dans une même chaîne ; d'ailleurs cette étude a déjà été faite avec soin pour les montagnes d'Europe.

Je cherche surtout à donner une idée de la variation de la vitesse du vent avec l'altitude.

Dans les régions non accidentées, le régime du vent est relativement régulier dès qu'on dépasse 200<sup>m</sup> au-dessus du sol.

A la surface du sol<sup>(26)</sup>, la vitesse actuelle du vent peut varier dans de larges limites par rapport à la vitesse moyenne ; par exemple elle dépasse celle-ci de 50 %, et une ou deux secondes plus tard elle peut tomber à la moitié de cette vitesse moyenne. Ce qu'on peut dire à ce sujet, c'est que la variation absolue est, en gros, proportionnelle à la vitesse moyenne.

25. GAUSSEN (H.), *Géographie botanique et agricole des Pyrénées-Orientales* (Documents pour la carte des productions végétales, série Pyrénées, tome Roussillon, vol. I, Paris, 1934).

26. Cf. HUMPHREYS, *loc. cit.*

La vitesse moyenne du vent varie, au moins pour les couches inférieures de l'atmosphère, et en région non accidentée, suivant une fonction logarithmique de la hauteur au-dessus du sol.

Humphreys donne les résultats des observations de Gregg, faites à Drexel (Nebraska), à une latitude un peu inférieure à celle des Pyrénées.

En été la vitesse moyenne, voisine de 5,5 mètres par seconde au sol, augmente rapidement jusque vers 400<sup>m</sup> d'altitude, où elle atteint 11 m./s.; elle reste à peu près constante jusque vers 2.000<sup>m</sup> et augmente ensuite très légèrement pour atteindre 12 m./s. vers 3.000<sup>m</sup>.

En hiver, de 6 m./s. au sol, elle passe assez rapidement à 12 m./s. pour 300<sup>m</sup> environ, puis elle augmente plus lentement et régulièrement, prend la valeur 15 m./s. à 1.500<sup>m</sup> et 19 m./s. pour 3.000<sup>m</sup>.

A titre de comparaison, le vent le plus fort (W-S-W.) au Säntis (2.500<sup>m</sup>) atteint une vitesse moyenne de 39 km./h., soit 10,8 m./s.; à Zurich (470<sup>m</sup>) il est de 22 km./h., soit 6,1 m./s. On a donc dans les montagnes une augmentation du vent avec l'altitude, dans le même sens que dans l'atmosphère libre.

Dans nos régions, la vitesse du vent près de la surface du sol présente une variation diurne. En plaine la vitesse moyenne est minimum au lever du soleil, et maximum vers 13 à 14 heures. La variation est plus ample par temps clair et en été.

Au contraire, au sommet des montagnes, le maximum de vitesse a lieu pendant la nuit, et le minimum pendant la journée. C'est à peu près l'inverse de ce qui se passe en plaine.

Je me bornerai à ces indications générales; une étude un peu approfondie des vents nous conduirait bien au delà des limites acceptables.

Nous avons fait (§ 7 et suivants) une étude générale des variations en altitude des principaux facteurs qui interviennent dans l'évaporation et dans la transpiration des plantes. Il nous reste à contrôler sur les quelques résultats de mesures directes d'évaporation que nous possédons, si les variations ont bien lieu dans le sens prévu.

## 12. Mesures directes de l'évaporation.

a) Il existe des mesures directes d'évaporation pour les altitudes faibles et moyennes. En France, l'Office National Météorologique effectue des mesures régulières<sup>(27)</sup> qui semblent autoriser des comparaisons satisfaisantes, étant données les conditions assez semblables dans lesquelles elles sont faites. L'appareil employé est toujours le tube de Piche; cela est important: on sait que les résultats peuvent diverger beaucoup si on utilise des évaporimètres différents.

---

27. Bulletin annuel de l'O. N. M. de France, Paris.  
Bulletin mensuel de l'O. N. M. de France, Paris.

Pour fixer les idées, je donnerai quelques-unes des valeurs ainsi obtenues. Je me limiterai toujours aux mois de juillet, août et septembre.

Pour l'état hygrométrique je prendrai seulement les résultats de 13 heures puisque c'est en général à cette heure que l'évaporation est le plus intense.

b) Je prends par exemple les résultats donnés par l'O. N. M. pour les mois de juillet, août et septembre de l'année 1936.

En ce qui concerne le vent, le bulletin fournit les nombres de fois que la vitesse du vent a été observée (à 7<sup>h</sup>, 13<sup>h</sup> et 18<sup>h</sup>) comprise entre certaines limites. Il y a six de ces catégories, établies pour répondre aux besoins de la navigation aérienne. Les limites de ces catégories sont :

En km./h.	En m./s.
0 à 4	0 à 1,1
5 à 14	1,2 à 4,0
15 à 24	4,1 à 6,8
25 à 50	6,9 à 14,0
51 à 75	14,1 à 20,9
> 75	≥ 21,0

Pour avoir des indications facilement comparables, j'ai procédé de la façon suivante : j'ai pris la moyenne pour chaque catégorie et j'ai supposé que le nombre d'observations indiqué correspondait exactement à cette vitesse moyenne; j'ai fait la moyenne de l'ensemble. C'est cette moyenne que j'indique pour la vitesse du vent.

c) Considérons d'abord deux stations à la même altitude.

Paris-Mont-Valérien et Toulouse-Francazals sont toutes deux situées à 161<sup>m</sup> d'altitude.

Nous avons le tableau des résultats mensuels :

	Température de l'air moyenne		Évaporation (mm.)	Durée d'insolation (heures)	État hydr. à 13 h.	Vitesse moyenne du vent (m./s.)	
	Max.	Min.					
Juillet 1936.....	Mont-Valérien..	21,7	12,9	87,3	153,5	65	4,3
	Toulouse.....	24,2	14,3	103,9	222,5	57	2,6
Août 1936.....	Mont-Valérien..	23,5	13,4	94,1	203,7	61	3,2
	Toulouse.....	26,9	14,1	128,7	236,7	49	1,8
Septembre 1936.	Mont-Valérien..	20,8	12,2	67,2	130,4	66	3,9
	Toulouse.....	23,0	13,8	76,0	159,8	62	1,6

Il faut d'abord remarquer que la différence réelle des vitesses du vent doit être un peu moindre que ne le ferait croire le tableau, l'anémomètre du Mont-Valérien étant à 28<sup>m</sup> au-dessus du sol, et celui de Toulouse à 13<sup>m</sup> seulement. Les mesures du vent à Toulouse devraient être augmentées de 20 à 25 % pour être comparables à celles du Mont-Valérien.

Calculons le rapport des indices d'évaporation, et comparons-le au rapport des hauteurs d'eau réellement évaporées. On trouve pour les rapports de ces quantités à Toulouse par rapport à celles du Mont-Valérien :

	Juillet	Août	Septembre
Indice d'évaporation.....	1,4	1,5	1,3
Quantités évaporées.....	1,2	1,4	1,1

L'allure de l'évaporation est assez bien indiquée par les indices d'évaporation. Les deux facteurs antagonistes qui interviennent sont l'insolation, de durée plus longue à Toulouse (la latitude intervient aussi pour augmenter son intensité) et la vitesse du vent, qui est en moyenne plus faible à Toulouse.

Comparons rapidement les deux stations de

Pau-Pont-Long (190<sup>m</sup>),  
Toulouse-Francazals (161<sup>m</sup>),

situées presque sous la même latitude, et à des altitudes assez voisines.

		Température moyenne de l'air		Évaporation (mm.)	Durée d'insolation	État hyg. à 13 h.	Vitesse du vent
		Max.	Min.				
Juillet 1936	Pau.....	23,3	13,1	69,0	198,1	67	1,8
	Toulouse.....	24,2	14,3	103,9	222,5	57	2,6
Août 1936	Pau.....	25,2	13,3	68,3	238,8	62	1,1
	Toulouse.....	26,9	14,1	128,7	236,7	49	1,8
Septembre 1936	Pau.....	22,6	12,1	49,4	156,6	66	1,1
	Toulouse.....	23,0	13,8	76,0	159,8	62	1,6

L'anémomètre de Pau est à 10<sup>m</sup> au-dessus du sol; celui de Toulouse est à 13<sup>m</sup> : la vitesse moyenne du vent doit y être légèrement supérieure à celle qu'indique le tableau.

L'évaporation, beaucoup plus forte à Toulouse, s'explique par l'action simultanée de la température, de l'état hygrométrique, du vent et de la durée d'insolation. Il semble, d'après les valeurs d'août et de septembre, que la durée d'insolation ait un effet assez faible dans le cas considéré (altitudes et latitudes peu différentes).

d) Considérons deux stations dont les altitudes diffèrent d'environ 500<sup>m</sup>, soit

Lyon-Bron 196<sup>m</sup>;

Les Sauvages 723<sup>m</sup>.

Ces deux stations sont situées dans le département du Rhône.

		Température moyenne de l'air		Évapora- tion (mm.)	Durée d'insola- tion	État hygr. à 13 h.	Vitesse du vent
		Max.	Min.				
Juillet 1936.....	Les Sauvages..	19,5	11,5	53,7	169,3	73	3,4
	Lyon-Bron....	23,8	14,2	99,0	207,8	57	3,3
Août 1936.....	Les Sauvages..	21,1	12,4	49,9	244,0	74	3,1
	Lyon-Bron....	25,0	13,5	90,7	273,3	57	2,5
Septembre 1936.	Les Sauvages..	18,4	10,1	28,9	150,5	74	3,2
	Lyon-Bron....	22,3	12,4	69,7	188,2	60	2,8

La hauteur des anémomètres au-dessus du sol est 13<sup>m</sup> dans ces stations.

D'après l'examen du tableau il semble que la durée d'insolation, l'état hygrométrique et la température exercent l'action prédominante.

### 13. Essai d'appréciation des conditions d'évaporation pour l'étage alpin.

Les conditions de climat — ou plutôt de milieu, car nous avons vu que les conditions locales avaient une influence considérable — sont particulièrement rudes pour les plantes de l'étage alpin.

Si pendant la nuit (par suite de la basse température et de l'état hygrométrique élevé) l'évaporation est suspendue, il semble que pendant la journée l'insolation intense soit susceptible de l'exagérer. Nous avons vu (§ 7) que l'indice d'évaporation était souvent plus élevé à Bagnères-de-Bigorre qu'au Pic du Midi. Le calcul de cet indice tient compte de la pression atmosphérique, de la température de l'air, et de l'état hygrométrique.

Mais si l'on passe de la plaine au niveau alpin, l'insolation totale augmente considérablement (et aussi la quantité de rayons ultraviolets); on peut évaluer l'augmentation du rayonnement total à 25 % de sa valeur en plaine. La durée d'insolation aussi est augmentée.

La température du sol pendant le jour est élevée dans des proportions considérables : les plantes peuvent présenter dans leurs touffes des températures supérieures de 30 à 40° à celle de l'air à l'ombre. La nébulosité, en été, est généralement plus faible au niveau alpin qu'à des altitudes moindres. La vitesse moyenne du vent est un peu plus du double de la vitesse du vent en plaine : or la vitesse du vent intervient sur l'évaporation par sa racine carrée ainsi que nous l'avons vu chap. iv.

Si la vitesse du vent double, l'évaporation, toutes choses égales d'ailleurs, doit augmenter de 41 %.

Mais<sup>(28, 29)</sup> la température élevée du sol joue, sans doute, le rôle essentiel.

Pour fixer les idées, prenons l'exemple du Pic du Midi, lorsque l'état hygrométrique est 0,60, la température de l'air étant 9°<sup>(30)</sup>. Si la surface évaporante est à cette température<sup>(31)</sup> de 9°<sup>(30)</sup>, la vitesse d'évaporation a une certaine valeur. Si, les autres conditions restant les mêmes, la surface évaporante est à la température de 19°<sup>(30)</sup>, donc supérieure seulement de 10° à celle de l'air, la vitesse d'évaporation devient double. Or, dans nos calculs d'indices d'évaporation (§ 7) nous n'avons tenu compte ni du vent plus fort au Pic, ni du fait que la température de la surface évaporante pouvait être supérieure à celle de l'air à l'ombre.

L'inégalité que nous avons rencontrée en tenant compte uniquement de l'indice d'évaporation ne peut être maintenue. L'influence des autres facteurs que nous avons considérés suffit amplement pour en inverser le sens : nous devons conclure à la sécheresse du milieu alpin.

Une autre conclusion de cette étude, c'est que l'indice d'évaporation de Szymkiewicz ne doit pas être employé pour tenter de comparer des climats par trop différents ; cet indice ne suffit pas à lui seul, indépendamment des autres conditions, en particulier de celles dues à l'altitude.

Par contre le raisonnement de Szymkiewicz sur l'humidité du climat de « montagne » doit être maintenu sans modification s'il s'agit du niveau des forêts.

L'augmentation de l'intensité de l'évaporation, et par suite celle de la transpiration des plantes, explique que la végétation des hauts sommets est une végétation de lumière intense, de sécheresse pendant le jour, et de températures extrêmes. Cela permet d'expliquer la forme des plantes alpines et leur structure xéromorphe.

28. Cf. NÉTIEN (G.) et QUANTIN (A.), *Écologie des associations végétales de l'étage alpin des Alpes de l'Oisans (Plateau d'Emparis) III* (Bull. Soc. lin. Lyon. 1942).

Ces auteurs attribuent le rôle essentiel au vent. Mais leurs mesures directes d'évaporation ont été faites seulement par journées non ventées, ce qui ne permet pas de conclure.

29. Cf. GUINOCHE (M.), *Études sur la végétation de l'étage alpin dans le bassin supérieur de la Tinée (Alpes-Maritimes)*. (Thèses Sciences Grenoble, 1938.) Cet auteur a fait des mesures directes, mais pendant une seule journée, au-dessus de diverses associations végétales, pour montrer les différences microclimatiques entre elles. Nous envisageons ici le problème sous son aspect général.

30. Je prends ces valeurs 0,60 et 9°<sup>(30)</sup> comme exemples, parce qu'elles sont voisines des moyennes d'été.

31. C'est ce qui est supposé dans les calculs de l'indice d'évaporation.

## QUATRIEME PARTIE

### **Action des alternances d'humidité et de sécheresse sur la structure des plantes.**

INFLUENCE DE LA PÉRIODE DE CES VARIATIONS.

---

#### CHAPITRE VIII

##### **Dispositif expérimental.**

###### **A) Les problèmes expérimentaux à résoudre.**

Je voulais obtenir des variations assez brusques de sécheresse et d'humidité, avec des fréquences différentes. D'autre part, pour que les résultats fussent comparables, il était nécessaire de placer les sujets en expérience dans des conditions aussi identiques que possible, à part l'état hygrométrique. Pour des expériences de ce genre la solution classique est de prélever des graines sur le même pied, ou des portions de plantes séparées de la même touffe, et cultivées dans la même terre. C'est le seul procédé pratique pour éliminer des différences accidentelles de milieu ou de plante — encore que le procédé par semis n'élimine pas toutes les probabilités d'avoir des individus non absolument semblables —. J'ai donc, pour quelques sujets, opéré par division des touffes, en mettant de la terre aussi identique que possible dans les divers pots contenant des échantillons de même espèce. Chaque fois que cela était réalisable, j'ai exécuté les diverses expériences sur des feuilles ou des rameaux faisant partie du même pied. De cette façon on élimine probablement l'action différenciante de divers facteurs connus ou non. J'ai donc isolé, dans différentes éprouvettes de verre de dimensions convenables, diverses parties d'une même plante pour les soumettre à des alternances différentes de sécheresse et d'humidité.

Il restait maintenant à agir sur l'atmosphère limitée des éprouvettes, de façon à modifier régulièrement son état hygrométrique. Pour cela, la solution la plus pratique était de renouveler périodiquement l'air à l'intérieur des éprouvettes, en envoyant, suivant les cas, de l'air saturé d'humidité ou de l'air desséché. Il fallait aussi renouveler régulièrement cet air pour tous les tubes en expérience, afin d'éliminer les produits de la respiration et de la transpiration des rameaux ou

des feuilles emprisonnés, et maintenir la composition du milieu la plus identique possible dans tous les tubes (à l'humidité près). J'ai adopté comme unité de temps pour ce renouvellement le quart d'heure, intervalle assez court pour que la modification de la composition de l'air enfermé dans les éprouvettes soit insensible. Une fréquence plus rapide pour les alternatives de sécheresse et d'humidité ne permettrait pas aux plantes de réagir suffisamment et de prendre un état d'équilibre après chaque changement.

Une partie des éprouvettes devaient recevoir tous les quarts d'heure, alternativement de l'air sec et de l'air humide.

D'autres recevaient deux fois de l'air sec pendant une demi-heure; elles recevaient deux fois de l'air humide pendant la demi-heure suivante, et ainsi de suite.

D'autres recevaient quatre fois de l'air sec pendant une heure, et quatre fois de l'air humide pendant l'heure suivante...

De cette façon la constance de la sécheresse ou de la saturation de l'air était convenablement assurée dans toutes les éprouvettes pendant la période adoptée.

## B) Appareil utilisé.

### 1. Introduction.

Il ne me paraît pas superflu de décrire avec quelques détails l'appareil que j'ai fait construire pour cette série d'expériences. En effet il peut se présenter d'autres cas où l'on désire étudier l'action des alternances d'air de conditionnement variable. Ainsi l'étude de l'action des alternances d'air chaud et froid pourrait être effectuée avec une machine analogue à celle qui a été réalisée : on adapterait sur l'un des conduits principaux un dispositif de chauffage électrique.

L'appareil, par simple addition de contacteurs sur les diverses tiges de commande des soupapes, ces contacteurs établissant ou coupant le courant d'alimentation de lampes électriques convenablement disposées, se prêterait à l'étude de l'action des alternances d'éclairage. On pourrait même combiner l'action simultanée de plusieurs de ces facteurs.

Un appareil continu à gaz carbonique, muni d'une soupape commandée en même temps que le ventilateur, permettrait l'étude des alternances dans la teneur en anhydride carbonique de l'air.

Ces quelques exemples, pris au hasard, montrent qu'avec de légères modifications, mon appareil permettrait un grand nombre d'expériences variées et que son principe est susceptible de nombreuses utilisations. Toutefois sa mise au point ayant été assez délicate, puisqu'il s'agissait d'un premier modèle, je pense rendre service en donnant des précisions sur sa construction : une description détaillée de mon installation permettra à d'autres chercheurs d'éviter de nombreux tâtonnements.

## 2. Principe de l'appareil (fig. VIII, IX).

L'appareil que j'ai utilisé permettait d'envoyer automatiquement de l'air sec ou de l'air humide dans les éprouvettes de verre où étaient engagés des rameaux ou des feuilles des plantes étudiées. Le principe en est le suivant : un ventilateur électrique produit une circulation d'air ; une partie de cet air passe sur du chlorure de calcium desséché de façon à obtenir de l'air sec ; l'autre partie de l'air passe sur de la ponce imbibée d'eau, de manière à obtenir de l'air humide. Deux collecteurs recueillent, l'un l'air sec, l'autre l'air humide.

En relation avec ces collecteurs se trouvent des boîtes de départ des tubes se rendant aux éprouvettes où sont enfermées les plantes. Chaque boîte de départ renferme deux soupapes commandant l'arrivée de l'air sec ou de l'air humide.

Tous les quarts d'heure environ, la soufflerie se met en marche pour une durée de six minutes sensiblement : ce temps a été reconnu très amplement suffisant pour renouveler complètement l'air de la tuyauterie et des éprouvettes. En effet cette atmosphère est déjà notablement modifiée, en cas de changement de régime, au bout de deux minutes de fonctionnement de la soufflerie : un papier au chlorure de cobalt le montre par son virage. Le papier au chlorure de cobalt permet un contrôle rapide du fonctionnement de l'installation ; il ne saurait d'ailleurs être question de faire constamment la mesure du degré hygrométrique, ce qui ferait perdre tout l'avantage d'une installation automatique.

En même temps que se produit la mise en marche de la soufflerie, un autre moteur électrique entraîne, en moins de deux secondes, un arbre à cames destiné à la commande des soupapes.

En définitive dans les tubes n° 1 arrivent alternativement de l'air sec et de l'air humide tous les quarts d'heure.

Dans les tubes n° 2, on envoie, à deux quarts d'heure successifs, de l'air sec, puis, aux deux quarts d'heure suivants de l'air humide, et ainsi de suite.

Les tubes n° 3 correspondent à une heure d'air sec (renouvelé tous les quarts d'heure), suivie d'une heure d'air humide (renouvelé tous les quarts d'heure), puis une heure d'air sec...

De même pour les tubes suivants.

Nous étudierons donc successivement : la circulation et le conditionnement de l'air jusqu'à son arrivée dans les collecteurs, puis la distribution à l'aide de l'arbre à cames commandant les soupapes et enfin le dispositif de commande de l'installation.

## 3. Circulation et conditionnement de l'air.

### a) Choix du ventilateur.

Pour mettre l'air en mouvement de façon à l'obliger à remplacer celui qui se trouvait dans les éprouvettes, un ventilateur électrique était indispensable. Le choix

de cette turbine était déterminé par les deux conditions opposées suivantes : le ventilateur devait être assez puissant pour être capable de renouveler rapidement l'air de la tuyauterie et des éprouvettes : il avait à vaincre les pertes de charge dues à la résistance opposée par la traversée des dispositifs de séchage ou d'humidification et des tubes de distribution ; d'autre part l'air ne devait pas circuler trop rapidement, afin d'avoir le temps de se dessécher ou de s'humidifier convenablement.

L'évaluation des résistances opposées par les tubes desséchants ou humidifiants ne peut se faire à priori avec quelque précision. J'ai trouvé qu'il était préférable de prendre un ventilateur capable de donner un débit nettement plus élevé que celui qui serait nécessaire si on ne tenait pas compte des frottements de l'air dans les tubes à conditionnement et dans les conduites. Un rhéostat de réglage permet ensuite de ramener le débit à sa valeur optimum, pour tenir compte des conditions que j'ai indiquées.

Comme une grande précision était inutile, les formules industrielles courantes suffisaient pour établir les caractéristiques de cette turbine.

On sait que dans le cas d'un fluide il faut distinguer les pressions en état de repos et les pressions en état de mouvement. Si, dans une veine de fluide en mouvement, on place un obstacle, la surface de cet obstacle est soumise à une pression (pression totale) égale à la somme de deux termes : l'un est la pression statique du milieu (celle que l'on mesurerait si le fluide était au repos) ; l'autre terme est une quantité dépendant de la vitesse du fluide, et appelée pression dynamique (ou charge capable de la vitesse). Étant donnée une turbine prenant de l'air dans l'atmosphère pour l'envoyer dans une tuyauterie, l'excès de pression qui règne dans cette tuyauterie sur la pression atmosphérique est la pression dynamique. La formule approchée utilisable pour le calcul de cette pression dynamique se déduit du principe de Bernoulli. En négligeant la composante de la pesanteur et les frottements, ainsi que la compressibilité de l'air (l'erreur ainsi commise est négligeable ; elle ne dépasse pas 2 % pour les vitesses inférieures à 100 mètres par seconde), on a :

$$h = \delta \frac{V^2}{2g},$$

$h$  pression en kilogrammes par centimètre carré (ou en millimètres d'eau),

$\delta$  poids spécifique du fluide en kilogrammes par mètre cube,

$V$  vitesse du fluide en mètres par seconde,

$g$  accélération de la pesanteur.

Puisqu'on a négligé les frottements et la compressibilité, on peut admettre, avec la même approximation, que la vitesse du fluide est égale à la vitesse tangentielle



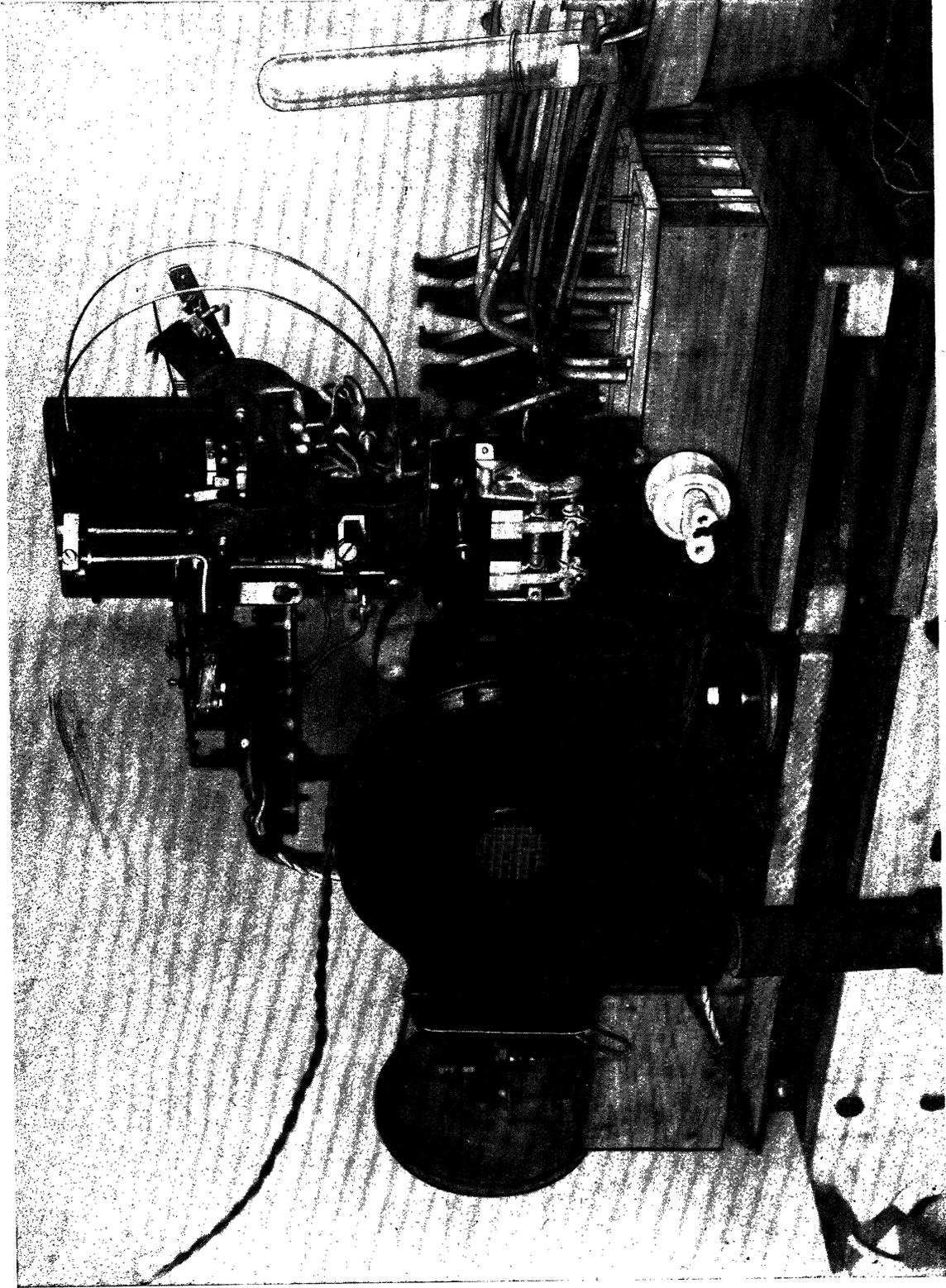


FIG. VIII. — PHOTOGRAPHIE DE LA MACHINE.

Côté de la minuterie.

On distingue, au milieu et en haut, la minuterie (voir fig. XVI et XVII); un peu plus à gauche, le ventilateur. Tout à fait à gauche, on aperçoit la poulie entraînant l'engrenage à vis sans fin.

En bas, à droite, on voit une partie des boîtes de distribution surmontées des tubes de départ.

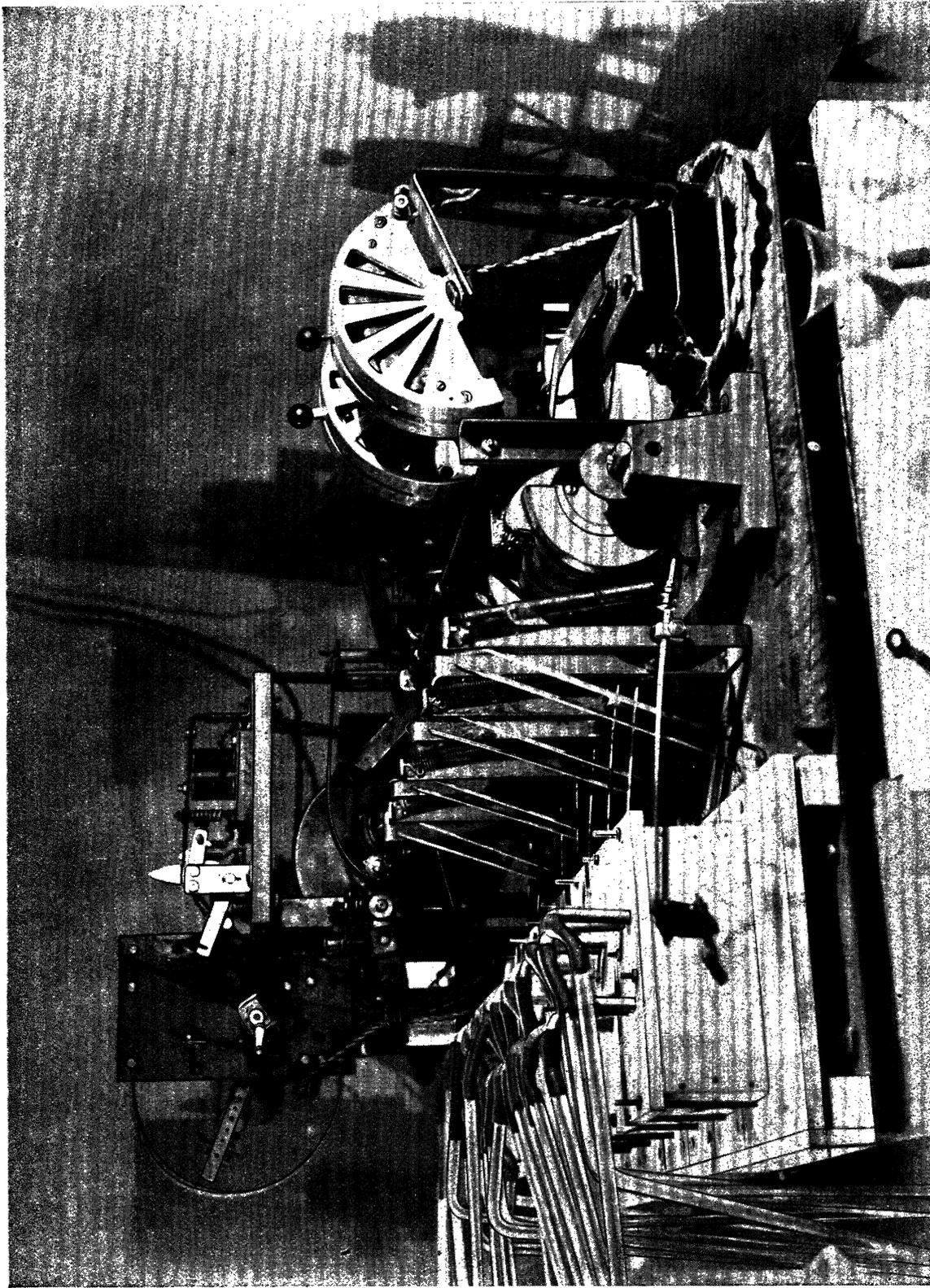


Fig. IX. — PHOTOGRAPHIE DE LA MACHINE.  
Côté de l'arbre à cames.

On aperçoit au centre une partie des cames, ainsi que les tiges de commande des soupapes (voir fig. X et XI).  
Au dessus, le système de commande du moteur des cames (voir fig. XVIII et XIX).  
A la gauche de ce système, l'arrière de la minuterie et le compteur. A gauche, une partie des boîtes de distribution et des tubes de départ.  
A droite, les rhéostats de réglage des moteurs; au dessous, les entonnoirs de remplissage des éprouvettes humidifiantes.



de la turbine. Si  $n$  est le nombre de tours par minute de celle-ci, le nombre de tours par seconde est  $\frac{n}{60}$ ; en appelant  $D$  le diamètre de la turbine :

$$V = \pi D \frac{n}{60}.$$

Enfin si on désigne par  $S$  la section du tuyau de sortie de l'air, le débit sera  $S \times V$  (toujours avec les mêmes approximations).

Ces formules usuelles m'ont permis de déterminer les caractéristiques du ventilateur. Celui que j'ai utilisé, du type des ventilateurs de gazogène, avait des pales de 17<sup>cm</sup> de diamètre; le moteur d'entraînement tournait à 3.200 tours par minute sur 110 volts (il n'y avait pas à se préoccuper du calcul de la puissance nécessaire au moteur, l'ensemble moteur turbine étant fourni par le constructeur). Le tuyau de sortie de la turbine avait 1<sup>cm</sup>,6 de diamètre intérieur.

Un rhéostat permettait de réduire la vitesse de rotation et de la fixer à une valeur convenable. Voici quelques exemples des pressions et des débits obtenus pour divers régimes, calculés à l'aide des formules précédentes.

, Pour 3.200 tours par minute, soit 53,3 tours par seconde, la vitesse tangentielle était :

$$V = 3,14 \times 0,17 \times 53,3 = 28 \text{ mètres par seconde,}$$

comme  $\delta = 1,3 \text{ kg par m}^3$ ,

et  $g = 9^m,8$  par seconde et par seconde, la pression était :

$$h = \frac{28 \times 28 \times 1,3}{2 \times 9,8} = 52 \text{ millimètres d'eau.}$$

La section de l'orifice sortie de l'air est :

$$S = 3,14 \times 0,008 \times 0,008 = 0^m^3,0002,$$

d'où le débit :

$$S \times V = 0,0002 \times 28 = 0^m^3,0056 \text{ par seconde,}$$

soit 5,6 litres par seconde.

Il s'agit naturellement du débit maximum théorique, correspondant au cas où l'air serait distribué sans éprouver aucune résistance; pratiquement, par suite des frottements, la quantité débitée sera moindre.

Des calculs analogues nous donneraient, pour 2.400 tours par minute (soit 40 tours par seconde), une vitesse de 21<sup>m</sup>,3 par seconde, soit une pression de 30<sup>mm</sup> d'eau et un débit théorique maximum de 4,2 litres par seconde.

Les pressions vérifiées avec un manomètre à eau concordaient à 1<sup>mm</sup> près avec les pressions données par le calcul.

Par un emploi judicieux du rhéostat de réglage on arrive à concilier les conditions de débit imposées.

b) *Tuyauterie de départ du ventilateur.*

Disposant d'une quantité d'air suffisante, il fallait la répartir convenablement entre les dispositifs de conditionnement. Un tuyau de 35<sup>mm</sup> de diamètre, partant du ventilateur, allait se bifurquer entre deux boîtes rectangulaires destinées à mettre chacune en parallèle deux récipients de verre du type des éprouvettes desséchantes du plus grand modèle.

Il y avait donc deux de ces éprouvettes destinées à dessécher une partie de l'air, et deux autres destinées à humidifier le reste.

c) *Éprouvettes desséchantes.*

Pour obtenir de l'air sec, l'air normal passait dans deux éprouvettes disposées en parallèle.

La substance desséchante ne pouvait être prise au hasard. La potasse ou la soude caustiques auraient enlevé du gaz carbonique à l'air et introduit ainsi une modification supplémentaire. Parmi les desséchants couramment employés, il restait à choisir entre l'acide sulfurique et le chlorure de calcium. Des essais préliminaires avec de la ponce sulfurique ne m'avaient pas donné de résultats satisfaisants; les plantes en expérience paraissaient souffrantes et atteintes de brûlures: il semble que l'air ait entraîné des produits nocifs (probablement des traces de gaz sulfureux formé en présence de matières organiques alors que je chauffais la ponce sulfurique pour régénérer son pouvoir desséchant).

Au contraire le chlorure de calcium fondu et desséché au moment de l'emploi n'a pas présenté d'inconvénients de ce genre; c'est donc lui que j'ai adopté. Il a un autre avantage, c'est de pouvoir se récupérer facilement à partir de la solution qu'il forme en absorbant l'eau; le chauffage de cette solution jusqu'à l'obtention du produit sec ne présente aucun désagrément. Cette solution pouvait être aisément recueillie sans démontage de l'appareil: le gros tube de caoutchouc reliant la tubulure inférieure de l'éprouvette desséchante au tuyau de départ de l'air sec était percé d'un petit trou; par ce trou pénétrait un tube de verre recourbé dont une extrémité aboutissait au fond de l'éprouvette, de façon à former siphon; l'autre extrémité de ce tube était raccordée à un autre tube de verre qui traversait le bouchon fermant une des tubulures supérieures d'un flacon à trois tubulures et à robinet latéral; le tube arrivait au fond du flacon. La seconde éprouvette desséchante était reliée de même à la deuxième tubulure. Enfin la troisième tubulure du flacon était munie d'un bouchon traversé par un tube raccordé à une poire en caoutchouc.

Par simple pression sur cette poire on amorçait simultanément les siphons ; le liquide rassemblé au fond des éprouvettes desséchantes s'écoulait et passait dans le flacon à trois tubulures ; on pouvait ensuite le soutirer par le robinet latéral. Le liquide, recueilli dans un plateau de fer émaillé, était concentré et l'eau évaporée ; il suffisait ensuite de réduire le chlorure de calcium sec en fragments de la grosseur d'une petite noisette.

Le remplissage des éprouvettes desséchantes se faisait une fois par vingt-quatre heures ; d'ailleurs tout le chlorure de calcium était loin d'être épuisé dans ces conditions, grâce à la forte capacité des éprouvettes. Pour effectuer la recharge, au-dessus de chaque éprouvette desséchante un trou avait été réservé dans la boîte rectangulaire ; il pouvait être fermé par un bouchon ; pour garnir les éprouvettes, on enlevait le bouchon, et on introduisait un tube de verre de même diamètre pour guider les morceaux de chlorure de calcium jusqu'à l'intérieur de l'éprouvette. L'opération était ainsi de courte durée et on évitait le démontage des éprouvettes.

Le joint entre la partie supérieure des éprouvettes et la boîte rectangulaire était rendu étanche à l'aide d'une plaque de caoutchouc. Les éprouvettes étaient fortement appliquées contre la boîte à l'aide d'une tige filetée et d'un écrou.

d) *Éprouvettes humidifiantes :*

Une autre boîte rectangulaire était disposée sur l'autre dérivation du parcours de l'air ; elle était branchée de la même façon sur deux éprouvettes semblables aux premières et placées aussi en parallèle, mais destinées à charger l'air d'humidité. Elles contenaient de la ponce granulée et de petites coupelles en terre poreuse formant réservoirs d'eau. Ces éprouvettes étaient garnies d'eau deux fois par jour. Comme pour l'autre batterie d'éprouvettes, le remplissage était prévu sans démontage ; les trous percés au-dessus des éprouvettes étaient fermés par des bouchons traversés par des tubes de verre ; au-dessus du bouchon chaque tube était coudé à angle droit ; l'autre extrémité était également coudée de façon à être verticale, l'ouverture tournée vers le haut et munie d'un petit entonnoir ; enfin sur la partie horizontale du tube on avait établi une courbure en U de façon à former manomètre. Pour le remplissage, il suffisait de verser de l'eau dans l'entonnoir ; cette eau s'écoulait jusque dans l'éprouvette, mais une partie restait dans la portion du tube recourbée en U : cela assurait la fermeture et avait l'avantage de constituer un petit manomètre à eau permettant de se rendre compte de la bonne marche du ventilateur.

e) *Collecteurs.*

Chaque batterie de deux éprouvettes était raccordée à un tuyau de 25<sup>mm</sup> de diamètre destiné à emmener l'air sec ou l'air humide. Chacun de ces tuyaux se rendait dans un collecteur ayant la forme d'une boîte très allongée. Les deux

collecteurs (celui de l'air sec et celui de l'air humide) étaient placés côte à côte. Le couvercle de chacun d'eux était percé de huit trous le mettant en relation avec les huit boîtes de départ.

#### 4. Distribution.

##### a) *L'arbre à cames.*

Il fallait encore un système permettant de commander le passage de l'air sec ou de l'air humide, à des intervalles de temps déterminés. Ce système de commande a été réalisé au moyen de cames tournant autour d'un même axe (*fig. IX*).

Un arbre portait quatre sections identiques; ces sections avaient été réalisées en bois dur, et les parties frottantes garnies de tôle d'acier; ce dispositif a fonctionné plusieurs années sans usure appréciable: il a donc été inutile de faire réaliser ces sections entièrement en métal.

##### b) *Description d'une section de l'arbre à cames.*

Chaque section comportait (*fig. X*, en haut et à gauche): un dispositif d'entraînement;

Une première came constituée par deux quarts de cercle opposés:

Une seconde came formée d'un demi-cercle limité parallèlement à un diamètre limitant les deux quarts de cercle de la première came;

Enfin chaque section (sauf la dernière) portait un ergot destiné à entraîner la section suivante, de façon à ce qu'une section tourne d'un quart de tour quand la précédente a fait un tour complet.

L'ergot était fixé sur sa section par une lame d'acier portant un plot d'une certaine épaisseur. Pendant trois quarts de tour l'ergot passait devant des rayons métalliques fixes sur la section suivante (quatre rayons disposés à  $90^\circ$  l'un de l'autre) sans les accrocher; mais, au dernier quart de tour, le plot était forcé de passer en frottant le long d'un guide correspondant à une rotation de  $90^\circ$ ; ce guide obligeait la lame élastique à s'écarter de sa position d'équilibre, et l'ergot venait accrocher un rayon de la section suivante; il l'entraînait de  $90^\circ$ , et l'ergot était libéré. Au déplacement suivant, il n'accrochait plus de rayon...

De cette façon la deuxième section avançait d'un quart de tour pour un tour de la première: la troisième tournait d'un quart de tour pour un tour de la deuxième, etc.

##### c) *Commande de l'arbre.*

La première section (*fig. XI*, en haut et à gauche) seule était entraînée de façon différente. Un moteur électrique faisait tourner tous les quarts d'heure cette section d'un quart de tour (*fig. XII, XIII, XIV, XV*). Le moteur tournant à assez grande

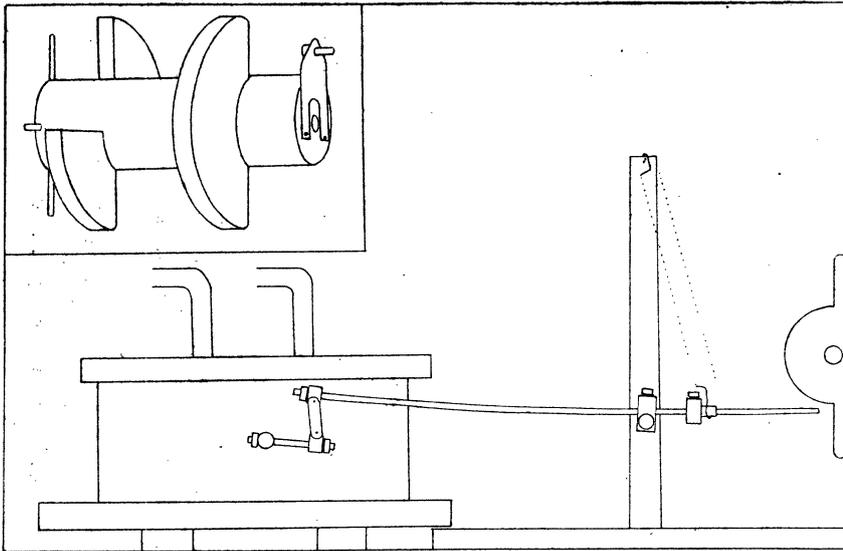


FIG. X.  
COMMANDE DES SOUPAPES.

L'arrivée de l'air humide est fermée; l'air sec passe dans les tubes de départ (on n'a représenté que deux de ces tubes sur la boîte).

En haut et à gauche : une section intermédiaire de l'arbre à cames.

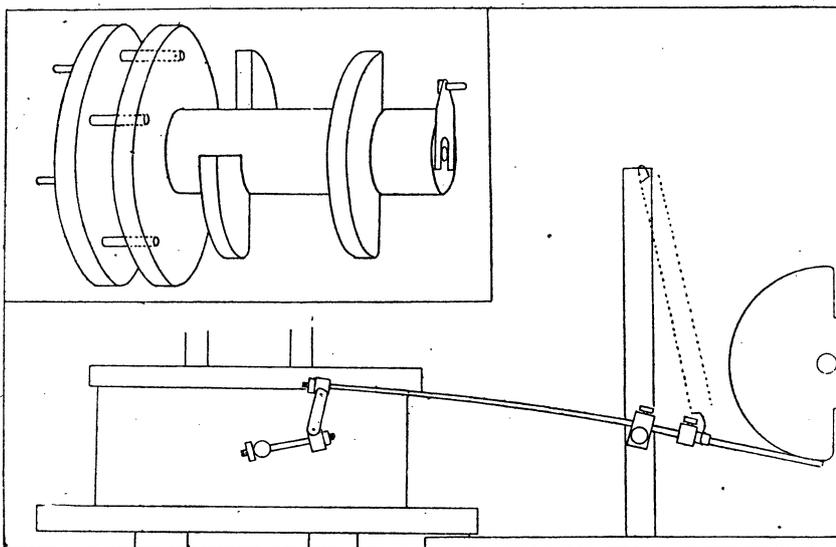


FIG. XI.  
COMMANDE DES SOUPAPES.

L'air sec est arrêté; l'air humide passe dans les tubes de départ.

En haut et à gauche : la première section de l'arbre à cames.

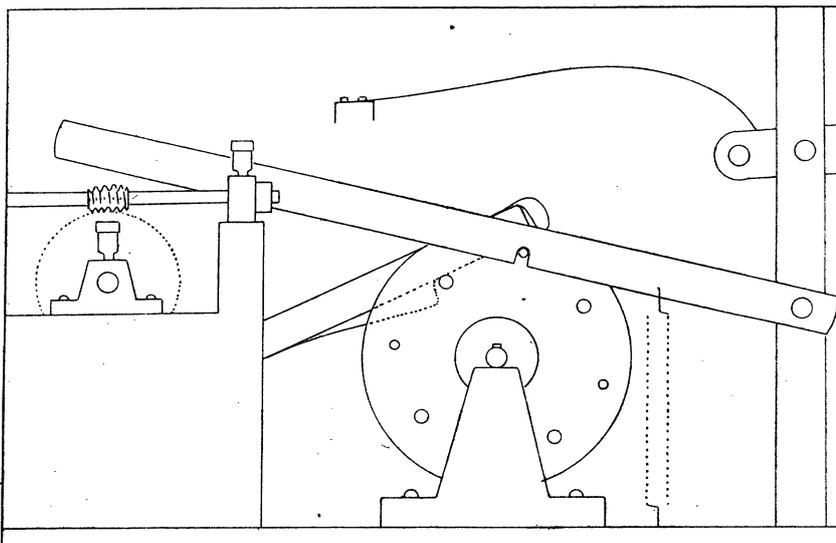
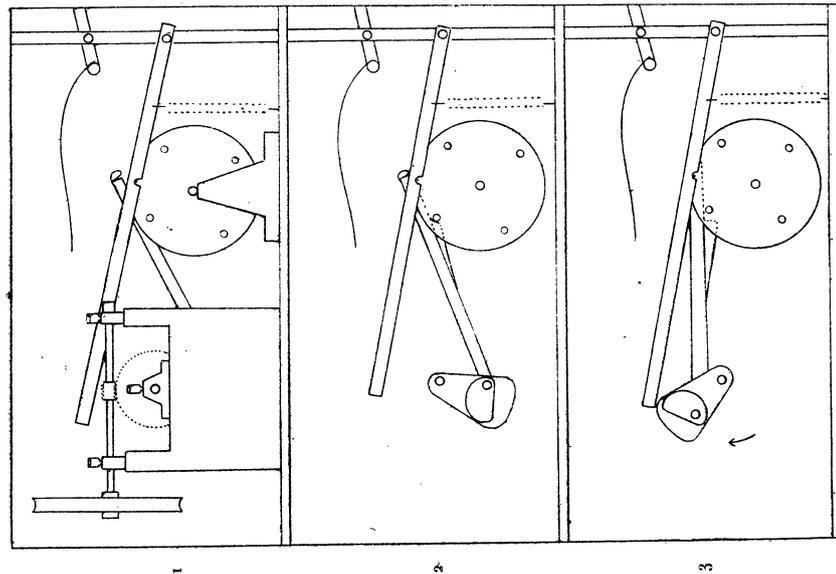


FIG. XII.  
COMMANDE DE L'ARBRE A CAMES;  
AU REPOS.

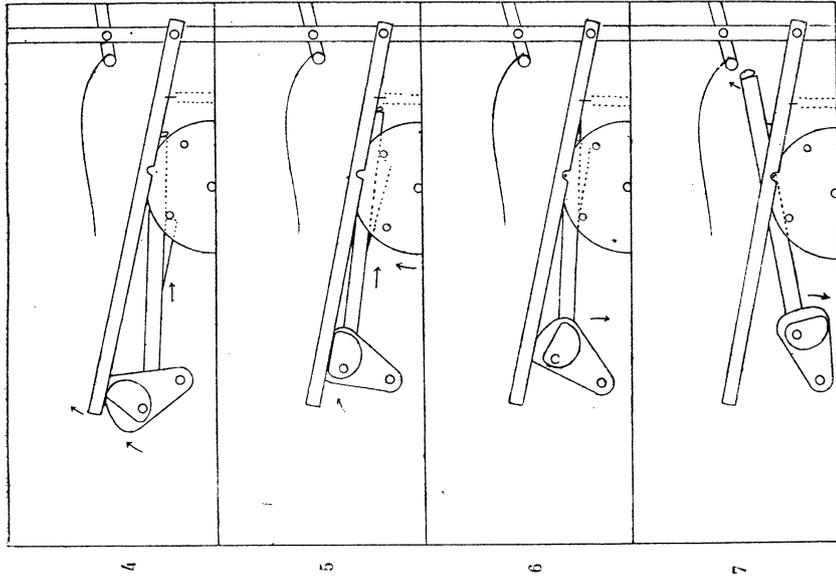
A gauche on voit l'engrenage à vis sans fin.

La partie inférieure de la roue dentée vient plonger dans un bac à huile.



XIII

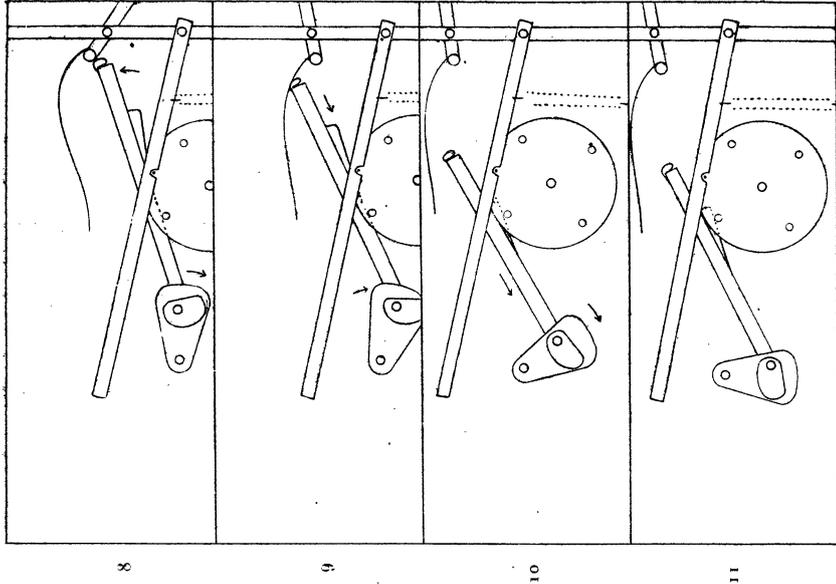
- 1) Vue d'ensemble. Tout à fait à gauche on voit la tranche de la poutie, qui sera entraînée par le moteur électrique.
- 2) Détail de l'entraînement, à la fin de l'intervalle de repos. On voit : la manivelle solidaire de la roue dentée ; le bras de commande, avec sa petite came auxiliaire ; la première section de l'arbre à cames et le verrou de blocage. Au dessus, et à droite, le système de commande du moteur des cames.
- 3) Le moteur des cames tourne et va agir sur la première section.



XIV

Fig. XIII à XV. — COMMANDE DE L'ARBRE A CAMES. FONCTIONNEMENT.

- 4) Le verrou de blocage est soulevé, libérant la première section ; le bossage de la tige de commande commence à faire tourner la section.
- 5) La première section a presque accompli un quart de tour ; le verrou commence à revenir appuyer sur l'ergot.
- 6) La première section a fini son quart de tour ; le verrou s'abaisse et l'immobilise ; le bras de commande débraye.
- 7) L'extrémité de la tige de commande va attaquer le levier qui provoquera l'ouverture du verrou du contacteur du moteur des cames.



XV

- 8) La tige de commande agit sur le levier débloquant le verrou de l'électro-aimant de commande du moteur ; ce levier fait en même temps augmenter d'une unité le nombre marqué au compteur.
- 9) et 10) La tige de commande vient d'échapper ; le courant du moteur est coupé. Le moteur continue à tourner à cause de la vitesse acquise.
- 11) Le moteur est à peu près arrêté.

vitesse, il était indispensable de le démultiplier considérablement; une courroie transmettait le mouvement à une poulie de diamètre beaucoup plus grand que celle de l'arbre moteur. Cette poulie était solidaire d'une vis sans fin qui entraînait à son tour une roue dentée. L'arbre de cette roue portait une manivelle; celle-ci entraînait le bras de commande, et au moyen d'une petite came, libérait le dispositif de blocage de la première section. Sur cette section se trouvaient fixées quatre tiges métalliques, à 90° l'une de l'autre. Le bras de commande agissait sur l'une d'elles, de façon à faire avancer la section d'un quart de tour. La position exacte était déterminée par le dispositif de blocage (lame de métal rappelée par un ressort et portant une encoche dans laquelle s'engageait une tige portée par la section).

Le bras de commande, en revenant en arrière par suite de la rotation de la manivelle, interrompait le courant actionnant le moteur: celui-ci s'arrêtait jusqu'au quart d'heure suivant (voir § 5).

d) *Boîtes de départ.*

Nous avons déjà vu que les trous percés dans la paroi supérieure des collecteurs étaient mis en relation deux par deux (un sec et un humide) avec une boîte de départ.

Il y avait huit de ces boîtes, de forme rectangulaire; elles étaient en relation par la partie inférieure avec les deux collecteurs. Le couvercle de chaque boîte était percé de quatre trous portant chacun un petit tube de laiton. Ces tubes de laiton étaient reliés par des tubes de caoutchouc aux tubes de verre communiquant avec les éprouvettes ou les cloches renfermant les plantes. On pouvait donc mener de front jusque quatre expériences. Chaque boîte pouvait laisser passer l'air sec ou l'air humide.

e) *Les soupapes et leur commande.*

Il restait à faire passer à volonté l'air sec ou l'air humide des collecteurs dans les tubes issus d'une boîte de départ. Dans ce but, la boîte de départ contenait un système de deux soupapes, l'une fermant l'arrivée d'un des collecteurs, tandis que l'autre était ouverte. Ces soupapes, en cuir, montées sur métal, venaient reposer sur des sièges en laiton; chacune d'elles était guidée verticalement par une tige glissant dans un tube centré sur le siège. Les deux soupapes d'une même boîte étaient portées par des fourchettes solitaires d'un même axe horizontal. L'extrémité de cet axe sortait de la boîte; il était muni d'une petite barre au bout de laquelle s'articulait une barrette de liaison avec une tige d'acier. Cette tige d'acier était mobile autour d'un axe horizontal; son autre extrémité arrivait en face d'une des cames; un ressort à boudin obligeait la tige à serrer fortement sur la came. Lorsque le bossage de cette came appuyait sur la tige, la soupape d'admission de l'air sec était fortement appliquée sur son siège, et seul l'air humide pouvait pénétrer dans

la boîte de départ; au contraire, si le creux de la came se trouvait devant la tige, c'est l'air sec qui pénétrait dans la boîte, la soupape de l'air humide étant fermée (*fig. X et XI*).

En définitive, en numérotant les boîtes à partir de l'extrémité commandée par le moteur, la boîte 1 voyait ses soupapes basculer chaque quart d'heure; la boîte 2 (seconde came de la première section) avait ses soupapes basculant toutes les demi-heures; la boîte 3 (première came de la deuxième section) avait les siennes basculant toutes les heures; et ainsi de suite, en doublant l'intervalle d'une came à la suivante, jusqu'à la boîte 8 dont les soupapes basculaient toutes les trente-deux heures.

Les frottements de l'ensemble des tiges sur les cames, et ceux des plots sur les guides dans le cas d'entraînement de plusieurs sections, exigeaient une assez grande puissance du moteur d'entraînement. Celui-ci était un moteur de  $\frac{1}{6}$  de cheval, pouvant tourner à 3.500 tours par minute; un rhéostat permettait de régler convenablement sa vitesse.

### 5. Dispositif de commande automatique de l'ensemble de l'installation.

#### a) *Minuterie.*

Il fallait d'abord commander la marche du moteur d'entraînement de l'arbre à cames, et celle du ventilateur, tous les quarts d'heure; le moteur d'entraînement devait s'arrêter dès que la première section de l'arbre à cames avait tourné de  $90^\circ$ , et le moteur du ventilateur devait continuer à tourner quelques minutes avant de s'arrêter.

Le choix de la minuterie permettant la remise en marche tous les quarts d'heure était rendu plus facile par le fait qu'il était inutile de rechercher une rigueur excessive: l'intervalle d'un quart d'heure n'avait besoin d'être déterminé qu'approximativement, une erreur d'une fraction de minute ne pouvant modifier d'une façon capitale les résultats. J'ai donc adopté une minuterie analogue à celles employées dans les installations d'éclairage, convenablement réglée de façon à se remonter automatiquement tous les quarts d'heure; elle m'a permis, moyennant certaines modifications, d'établir le système de commandes électriques de toute l'installation. Normalement, une telle minuterie est composée d'un électro-aimant avaleur qui remonte une barre de fer doux quand le courant passe; dès que cette tige est remontée, elle fait basculer un contacteur à mercure qui interrompt le courant. Ensuite la barre de fer doux redescend lentement, en inclinant progressivement le contacteur à mercure; dès que le contact est rétabli dans celui-ci, le courant passe à nouveau, la barre de fer remonte et coupe le courant, et ainsi de suite.

#### b) *Modifications apportées à la minuterie.*

Il fallait, dès que la barre de fer doux était remontée, couper le courant dans

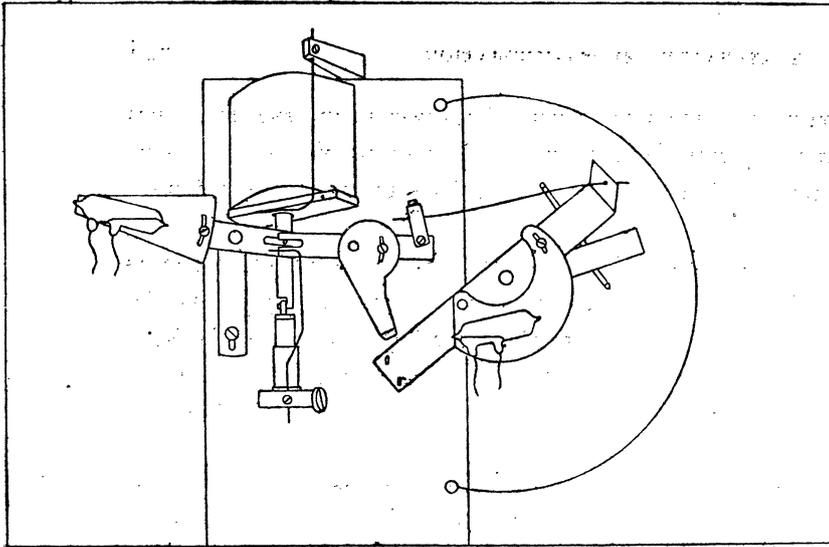
l'électro-aimant de la minuterie, mais continuer à l'envoyer au moteur des cames jusqu'à ce qu'il ait entraîné la première section de  $90^\circ$ , et au moteur du ventilateur pendant cinq ou six minutes : il fallait donc ajouter deux autres systèmes d'interruption.

Voyons d'abord le système commandant le ventilateur ; il ne présentait pas de difficulté particulière : il suffisait d'ajouter un deuxième interrupteur à bascule, entraîné par la barre de fer doux. Il devait être convenablement réglé, de façon à fonctionner au début de la descente de cette barre, et à couper le circuit du ventilateur au bout du temps prescrit ; des tâtonnements permettent d'obtenir le réglage voulu (*fig. XVI, XVII*).

Pour la commande du moteur des cames, il fallait disposer un interrupteur fermant le circuit du moteur dès la remontée de la barre de fer doux, et coupant ce circuit dès que la première section de l'arbre à cames a avancé de la quantité prévue. Un troisième contacteur à mercure était fixé à une lame de fer dont l'extrémité était tenue par une lamelle d'acier formant ressort. Dans la position normale, légèrement inclinée, de la lame, le contact était coupé dans le contacteur à mercure, alors qu'il s'établissait si la lame était horizontale. Un petit électro-aimant, parcouru par le courant de remontage de la minuterie, attirait la lame de fer, et un crochet la bloquait dans la position horizontale : le circuit était alors établi dans le moteur des cames, qui se mettait en marche (*fig. XVIII, XIX*).

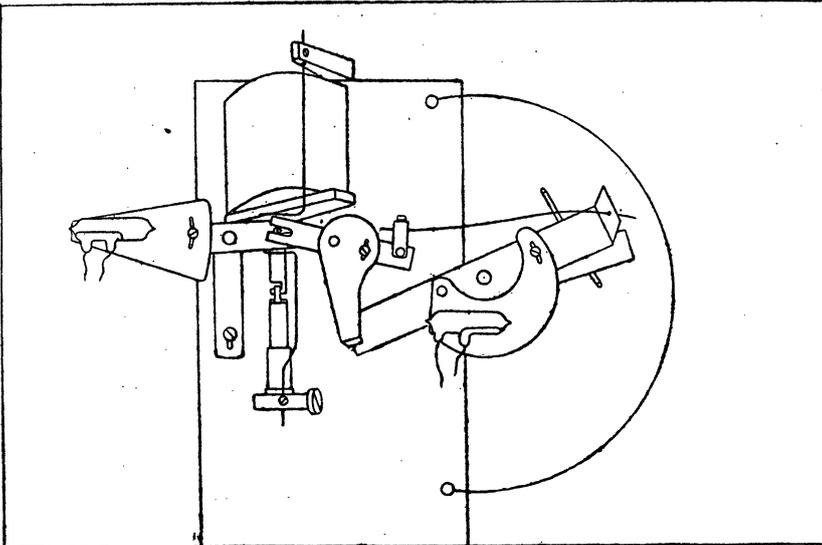
Je laisse de côté le dispositif de réglage très délicat, obtenu par essais successifs à l'aide de petits fils d'acier formant ressorts, de façon à imposer un léger retard à la rupture du courant de remontage de la minuterie : il fallait laisser le temps à l'électro-aimant de commande du moteur des cames d'être excité et au dispositif de blocage de cette commande de fonctionner.

Le courant de remontage de la minuterie cesse de passer ; le moteur de l'arbre à cames, étant en marche, entraîne la poulie, l'engrenage à vis tangente, et le bras de commande des cames. Ce bras porte à la partie inférieure un ergot qui s'engage sur une des quatre tiges métalliques portées par la première section et la pousse ; en même temps, une petite came montée sur la manivelle entraînant le bras soulève la lame de blocage de la première section. Cette section ayant avancé de  $90^\circ$ , la petite came de manivelle abandonne la lame de blocage de la section qui s'immobilise exactement à la position voulue. Mais le bras de commande, entraîné par la manivelle, commence à revenir en arrière ; son extrémité libre, garnie d'une lame élastique, se soulève et agit sur un levier ; ce levier tire, par l'intermédiaire d'un ressort à boudin, sur le crochet de blocage de la commande du moteur, et libère la lame qui se relève ; le contact du circuit du moteur est coupé, et celui-ci s'arrête. Grâce à ce montage, le moteur des cames s'arrête lorsque la manivelle a fait un tour complet et que la première section de l'arbre à cames a avancé d'un quart de tour.



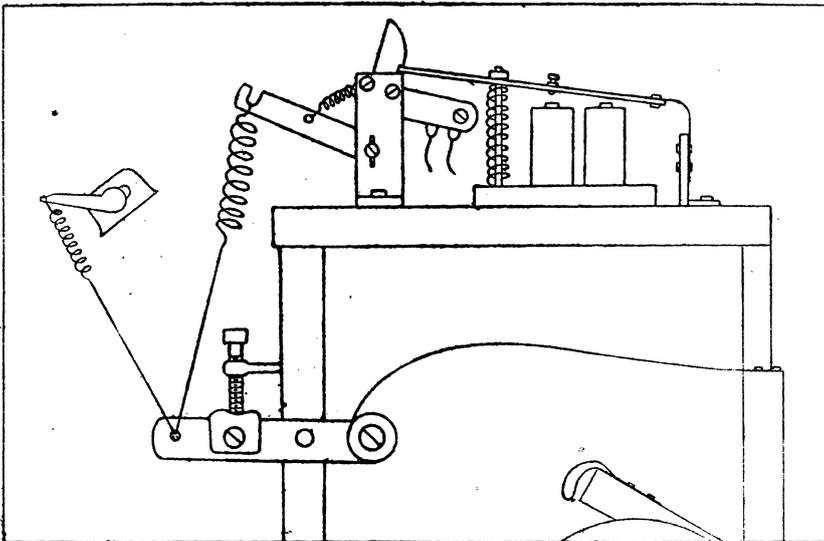
**FIG. XVI. — MINUTERIE  
AVANT RÉENCLACHEMENT.**

La minuterie est représentée  
à la fin de l'intervalle de repos.



**FIG. XVII. — MINUTERIE,  
LE VENTILATEUR FONCTIONNANT.**

La minuterie est représentée  
après réenclenchement ;  
le moteur a fait avancer l'arbre  
à cames ;  
le ventilateur fonctionne.



**FIG. XVIII. — COMMANDE  
DU MOTEUR DES CAMES ;  
ASPECT GÉNÉRAL.**

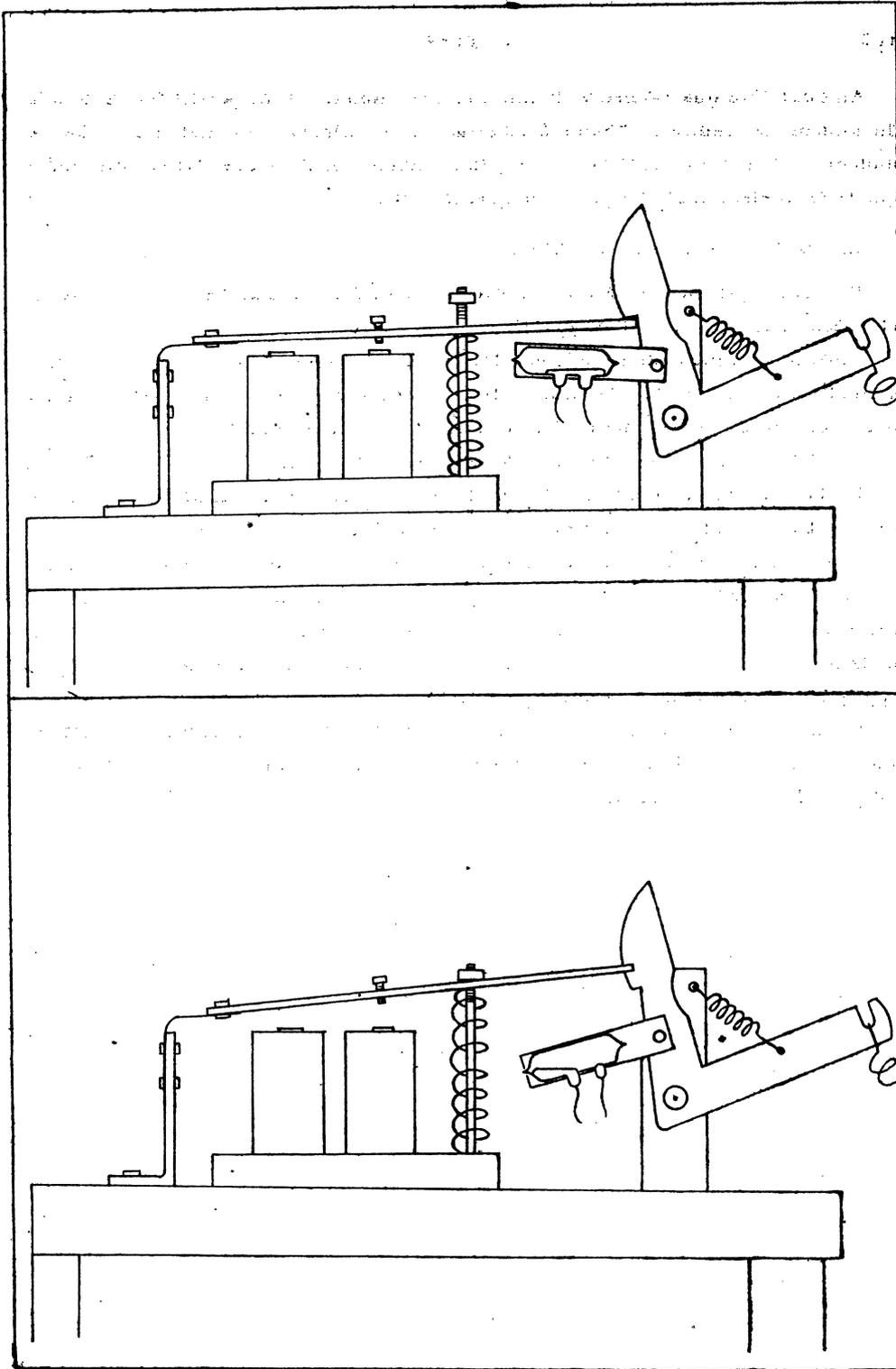


FIG. XIX. — COMMANDE DU MOTEUR DES GAMES; FONCTIONNEMENT.

Au bout d'un quart d'heure, la minuterie se remonte ; le dispositif de commande du moteur des cames se bloque à nouveau ; le ventilateur se remet en marche ; le moteur ayant entraîné l'arbre à cames, sa commande se débloque et il s'arrête tandis que le ventilateur continue pour quelques minutes.

c) *Dispositifs de sécurité et de contrôle.*

Plusieurs systèmes accessoires destinés à contrôler la marche de l'installation et à assurer sa sécurité ont été ajoutés.

Ainsi un compteur marque le nombre de fois que le système d'avance des cames a fonctionné : un ressort à boudin est tiré par le levier provoquant le déblocage de la commande du moteur des cames ; ce ressort agit sur le compteur.

J'ai déjà mentionné les rhéostats de réglage des moteurs.

Un bouton permet d'effectuer à volonté le remontage de la minuterie et la mise en marche des moteurs, afin d'en vérifier aisément le fonctionnement.

Pour éviter l'emballement du moteur des cames en cas de rupture de la courroie, ce moteur est fixé sur un palier articulé portant une lame métallique ; en fonctionnement normal, le poids du moteur agit pour tendre la courroie, et la lame métallique est soulevée ; au cas où la courroie se casse, la lame métallique vient appuyer sur un disjoncteur qui coupe le courant.

Enfin pour éviter les conséquences de tout court-circuit ou de toute augmentation anormale de l'intensité dans les appareils électriques, un disjoncteur automatique est placé à l'arrivée du courant.

---

## CHAPITRE IX

### Expériences — Mode opératoire.

---

#### A) Marche d'une expérience.

##### 1. Origine des plantes mises en expérience.

Comme je l'ai déjà dit, j'opérais, chaque fois que cela était réalisable, sur des feuilles ou des rameaux faisant partie d'un même pied.

Quand ce premier procédé était inapplicable, j'opérais sur des plantes obtenues par semis, à partir de graines issues du même pied, et élevées ensemble dans des conditions aussi semblables que possible. La méthode de division des touffes me permettrait d'opérer sur certains sujets ; j'employais cette méthode dans le cas où l'installation de plusieurs éprouvettes sur une même plante risquait de produire une gêne mutuelle, par exemple en modifiant l'éclairage, ou quand cela aurait obligé à donner aux portions de plante en expérience des positions trop différentes de celles rencontrées dans la nature.

Cependant il n'est pas toujours facile d'opérer dans les conditions précédentes : il fallait donc parfois s'adresser à des sujets qui risquaient de n'être pas identiques ; ces sujets étaient recueillis ensemble dans la même station ; une coupe d'une de leurs feuilles était examinée au microscope pour vérifier s'ils possédaient la même structure ; enfin, après les expériences, et après prélèvement de la portion de plante traitée, je laissais les pieds continuer librement leur développement jusqu'à fructification pour avoir un contrôle définitif de leur identité.

##### 2. Contrôle du pH de la terre.

Il restait à cultiver les plantes d'une même espèce d'une manière aussi identique que possible. Des pots à fleurs avaient été remplis au préalable de la même terre, bien mélangée et rendue homogène. Pour avoir un meilleur contrôle, j'ai vérifié le degré d'acidité de la terre contenue dans les divers pots utilisés, et cela au début et en cours d'expériences (dans le cas où les pots de terre cuite auraient réagi sur les eaux d'arrosage et par conséquent sur l'acidité de la terre qu'ils contenaient).

Cette mesure n'exigeant pas une trop grande précision, je me suis contenté de la méthode colorimétrique pour la détermination du  $pH$  de la terre. On sait que le  $pH$  est le logarithme de l'inverse de la concentration des ions hydrogène (Sørensen).

La méthode électrique de mesure du  $pH$  nécessite un matériel assez compliqué. D'autre part il n'était pas utile ici de rechercher une extrême précision : le but poursuivi était de mettre les plantes dans des conditions de milieu édaphique suffisamment semblables pour n'avoir pas à tenir compte de ce milieu.

La méthode colorimétrique était tout indiquée; je l'ai employée de façon à obtenir le  $pH$  à 0,1 près.

Pour déterminer le  $pH$  d'un échantillon de terre, j'ai adopté la convention et le mode opératoire habituels : une masse donnée de terre à étudier est mise en contact avec une masse dix fois plus grande d'eau distillée (et privée du gaz carbonique qui aurait pu s'y dissoudre depuis la distillation). Le liquide obtenu, après agitation puis décantation, donne un  $pH$  qui est, par convention, celui de l'échantillon de terre.

### 3. Installation des portions de plantes à étudier.

Les pots contenant les sujets en expérience étaient disposés sur une table de hauteur convenable pour que les tubes amenant l'air conditionné soient courts et présentent le minimum de coudes. Les portions de plantes étaient introduites dans des éprouvettes de verre de dimensions appropriées. Ces éprouvettes étaient tenues, à la hauteur et à la distance voulues, par des supports en fil de fer. La portion de plante ne venait pas appuyer sur le verre, afin d'éviter des influences mécaniques accidentelles.

Le tube d'amenée d'air pénétrait jusque près du fond de l'éprouvette. L'ouverture de celle-ci était partiellement obstruée de façon à empêcher l'air extérieur de venir modifier l'atmosphère intérieure de l'éprouvette; la fermeture n'était pas complète, pour permettre à l'air conditionné de balayer l'intérieur de l'éprouvette; cela avait aussi l'avantage de ne pas comprimer la portion de plante à l'endroit où elle pénétrait dans l'éprouvette.

Des parties de la plante, qui devaient servir de témoins, étaient également placées dans des éprouvettes semblables, faites du même verre, mais communi quant librement avec l'atmosphère; cela évitait l'influence due à l'absorption par le verre de certaines radiations.

Enfin, à titre de comparaison, certaines parties de la plante étaient absolument libres, en dehors des éprouvettes. Ce procédé a aussi l'avantage de montrer si l'action étudiée est nettement localisée.

## B) Expériences faisant aussi intervenir le pH du milieu.

### 1. Méthode d'étude de la germination du radis et du début du développement de la plantule.

Il est intéressant d'étudier les conditions de germination, parce que *pour qu'une plante se développe en un lieu donné, il faut que sa germination ne soit pas entravée par des conditions défavorables.*

J'ai fait quelques expériences de comparaison sur des plantules de radis se développant sur des sols de pH différents.

Des tubes de verre contenaient du sable; ce sable avait été soigneusement lavé à plusieurs reprises, puis imbibé d'une solution nutritive de pH connu. A titre de contrôle, le pH de ce sol artificiel était ensuite vérifié.

Dans chacun de ces tubes étaient semées quatre graines de radis. Un groupe de tubes était placé sous une cloche tubulée et soumis à des alternances de sécheresse et d'humidité. Les plantules étant déjà développées, on isolait leur sol de l'atmosphère par une mince couche d'huile de vaseline versée à la surface du sable, après avoir arrosé abondamment celui-ci avec le liquide nutritif de pH convenable; on évitait ainsi l'évaporation directe de l'eau par le sol.

Les tubes contenant les graines puis les plantules étaient réunis dans des cloches à tubulures. Les quatre orifices d'une boîte de départ de la machine aboutissaient tous à la même cloche pour assurer le renouvellement rapide et complet de l'air.

### 2. La concentration en ions hydrogène dans le sol.

Des multiples travaux effectués à ce sujet, il ressort que le pH du sol ne paraît pas être un facteur privilégié<sup>(1)</sup>. Il semble y avoir un optimum, souvent peu net. La variation de pH à l'intérieur d'une même station, d'apparence homogène, peut atteindre jusqu'à 2,5 (Raunkiaer; Hagène). « Les grands écarts entre les valeurs obtenues pour le même groupement mettent bien en évidence le fait qu'il n'y a pas habituellement de cause à effet entre le pH d'un sol et la végétation qu'il porte... Ce sont d'autres facteurs que le pH qui président à la répartition de l'espèce » (Hagène).

Il s'ensuit qu'une mesure rigoureuse du pH était inutile pour le but que je me proposais. Les méthodes colorimétriques donnent une précision amplement suffisante. Les différentes méthodes de mesure du pH ont leurs avantages et leurs inconvénients (cf. l'étude critique faite par Hagène). Si leurs résultats ne concordent

1. Cf. : LUNDEGÅRDH (H.), *Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben* (2<sup>e</sup> éd., Iéna, 1930).

HAGÈNE (Ph.), *Recherches écologiques sur quelques groupements végétaux des environs de Dijon* (Rev. Gén. Bot., XLIII, 1931).

pas absolument, cela n'a pas d'importance, pour les raisons déjà énumérées. J'ai utilisé celle qui m'était le plus commode dans les conditions où j'opérais : je me suis basé sur la méthode de Sørensen.

### 3. Mesure colorimétrique du pH.

A la solution dont on veut déterminer le pH, on ajoute des indicateurs colorés ; leur teinte varie avec le pH entre des limites particulières à chacun d'eux ; au-dessus et au-dessous de ces limites, la teinte est franche et fixe. Les colorants sont employés en solution diluée. J'ai utilisé les solutions alcooliques ordinaires à un demi pour mille. Ces solutions sont conservées en flacons de verre neutre ; les pipettes, compte-gouttes, tubes à essais sont également en verre neutre. Les essais se font sur 10<sup>cm<sup>3</sup></sup> de la solution à étudier, et généralement 10 gouttes de la solution d'indicateur. Les couleurs intermédiaires fournies par les indicateurs sont comparées avec celles que donnent des solutions de pH connu, de 0,1 en 0,1, et renfermant la même quantité de colorant ; on cherche le tube dont la couleur se rapproche le plus de celle du liquide à examiner. Les solutions que j'utilisais étant limpides, il n'était pas nécessaire de recourir au comparateur. La méthode des tampons (solutions riches en mélanges de sels, dont le pH varie peu en fonction du temps) permet d'établir des échelles de coloration pour chaque indicateur. Ces échelles se conservent en général plusieurs mois à l'abri de la lumière. On les établit dans des tubes de verre neutre semblables à ceux qui servent pour les mesures ; après addition d'une goutte de toluène, on les ferme avec des bouchons de liège paraffinés.

Dans les limites de pH entre lesquelles j'opérais, j'ai surtout utilisé le bleu de bromothymol (6,0 à 7,6) et le rouge de phénol (phénolsulfonephtaléine : 6,8 à 8,4). D'autres colorants, tels que le bromocrésol pourpre (dibromocrésolsulfonephtaléine : 5,2 à 6,8) et le rouge de crésol (orthocrésolsulfonephtaléine : 7,2 à 8,8), me servaient pour les vérifications.

### 4. Choix d'une solution nutritive.

Les formules de solutions salines nutritives ne manquent pas. Les liquides de culture de Nobbe et Siegert, de Mazé, de Knop, en sont des exemples classiques.

Dans le cas particulier qui m'intéressait, je voulais non seulement avoir une solution nutritive, mais pouvoir fixer son pH à une valeur déterminée, entre certaines limites. Pour cela il fallait d'abord éviter la production de précipités lors de l'ajustement du pH à la valeur désirée : la formation de précipités aurait éliminé de la solution certains éléments utiles. Il fallait en outre, pour ajuster le pH, employer des solutions qui ne puissent avoir une influence directe trop marquée sur la plante : il fallait éviter l'introduction inégale, dans les diverses solutions, d'éléments agissant directement sur la croissance des plantes.

Le sodium est un élément dont la proportion peut varier dans d'assez larges limites sans influencer notablement sur la croissance. J'ai adopté pour l'ajustement du pH des solutions nutritives le procédé suivant. J'ai établi trois liqueurs titrées; la première contenait  $\frac{1}{20}$  de molécule-gramme d'acide phosphorique par litre; la deuxième,  $\frac{1}{20}$  de molécule-gramme de phosphate monosodique par litre; la troisième,  $\frac{1}{20}$  de molécule-gramme de phosphate disodique par litre. Le mélange convenable de ces liqueurs permet d'obtenir des pH compris entre de très larges limites. L'addition de quelques gouttes de solution étendue de soude permettait de déplacer la limite vers les pH plus élevés.

En prenant des volumes égaux de ces liqueurs, on est certain d'avoir la même quantité de phosphore, qui est l'élément directement utilisable par la plante. Il est donc possible d'obtenir des solutions nutritives contenant toutes la même proportion d'éléments indispensables à la plante, mais dont le pH est variable.

Il fallait établir ces solutions nutritives en tenant compte des éléments indispensables, mais aussi en évitant les précipitations lors de l'addition des phosphates. Après quelques essais, j'ai trouvé que le liquide suivant me donnait des résultats satisfaisants :

Nitrate de calcium.....	1	gramme
Nitrate de potassium.....	0,25	
Sulfate de magnésium.....	0,25	
Chlorure de manganèse.....	1	
Nitrate d'urée.....	1	
Sulfate de fer.....	0,10	
Bromure de potassium.....	}	traces
Iodure de potassium.....		
Borate de sodium.....		
Sulfate d'aluminium.....		
Sulfate de zinc.....		
Sulfate de nickel.....		
Silicate de sodium.....		

cela pour un litre.

Un tel mélange, assez complexe en apparence, a l'avantage, après l'addition des phosphates, de renfermer tous les éléments actuellement considérés comme utiles à la plante; le carbone est fourni par le nitrate d'urée; l'azote, par les nitrates; le soufre, par les sulfates; le phosphore, par les phosphates, etc.

Les nitrates (de calcium, de potassium, d'urée) et le chlorure de manganèse sont

dissous ensemble; les sulfates de fer et de magnésium sont dissous ensemble. On mélange lentement ces deux solutions; on ajoute ensuite, en agitant, quelques gouttes de solution de chaque corps figurant à l'état de traces. Finalement on complète à un litre.

Cette première solution établie, il fallait amener son *pH* à la valeur convenable; un prélèvement de 10<sup>cm</sup><sup>3</sup> de cette première solution était effectué avec les précautions d'usage (pipettes et récipients en verre neutre), et soumis à des essais: cela permettait de se rendre compte de la proportion des liqueurs phosphoriques à ajouter pour obtenir à peu près le *pH* cherché. Le nombre de gouttes de chaque liqueur ajoutée me donnait ce rapport; un calcul simple me fournissait les nombres de centimètres cubes de chacune de ces liqueurs dans ce rapport, et tels que leur somme fasse 25<sup>cm</sup><sup>3</sup>.

L'addition faite lentement, en agitant, ne donnait pas de précipité. J'avais ainsi une solution dont le *pH* différait très peu de la valeur proposée. De nouveaux essais montraient quelle était la liqueur à ajouter: l'addition de quelques gouttes de cette liqueur dans le litre de solution nutritive suffisait pour établir le *pH* à la valeur demandée, ce qui était vérifié par un dernier essai.

### C) Expériences faisant intervenir l'intensité de l'éclairement.

#### 1. Objet de ces expériences.

Mes premiers essais portant uniquement sur l'action des alternances de sécheresse et d'humidité, toutes les autres conditions étant identiques, m'avaient amené à discerner une action de la durée des périodes des alternances.

Il paraissait intéressant de vérifier si l'action d'un éclairement plus ou moins intense intervenait pour modifier cette influence dans le sens que permettait de prévoir le raisonnement. En effet on sait qu'une forte lumière a tendance à produire des xéromorphoses<sup>(2)</sup>. Il était donc utile d'effectuer des essais avec des éclaircements différents. Comme il s'agissait d'une simple vérification qualitative, il n'était pas nécessaire de multiplier les expériences: une seule série assez complète suffisait.

#### 2. Les productions piliformes.

Les expériences classiques, que j'ai rappelées, sur l'action continue de l'air sec ou de l'air humide, montrent en particulier une modification des productions piliformes. Il était intéressant de voir, par la même occasion, si l'action sur la structure interne, que j'avais obtenue, s'étendait aussi à ces productions.

---

2. Cf. PENFOUND (W.-T.), *Plant anatomy as conditioned by light intensity and soil moisture* (Am. Journ. Bot., XVIII, 1931).

On peut admettre que les poils végétaux résultent du développement, perpendiculairement à la surface, de cellules de l'épiderme; la base demeure encastrée dans les cellules voisines, et parfois plonge profondément dans le tissu sous-épidermique. Ils ont des formes variées; on les classe suivant le nombre des cellules constituantes et leur mode de groupement (poils unicellulaires, constitués d'une seule cellule non cloisonnée; poils articulés, formés d'une file de cellules superposées; poils massifs, composés de files de cellules superposées et juxtaposées). Dans chacun des cas, on peut avoir affaire à des poils simples ou ramifiés, les ramifications pouvant en outre présenter divers aspects.

Je me suis adressé à *Hieracium Pilosella* pour cette série d'expériences combinées sur l'intensité de l'éclairement et les alternances de sécheresse et d'humidité de l'air. Cette plante possède en plus de poils filiformes, des poils articulés étoilés; ces poils étoilés devaient me permettre des comparaisons faciles.

### 3. Mode opératoire.

Il n'y avait aucune difficulté pour l'installation des expériences. Des stolons, autant que possible issus du même pied, étaient introduits dans les éprouvettes, mais certaines de ces éprouvettes étaient éclairées par la lumière du jour, et les autres par la même lumière, mais réduite par absorption. Des mesures photométriques m'ont montré que les écrans employés réduisaient la lumière sensiblement dans le rapport de 5 à 1. Même si l'absorption n'était pas rigoureusement uniforme pour toutes les radiations, il n'en restait pas moins que la variation d'intensité était considérable.

---

## CHAPITRE X

### Résultats des expériences.

---

#### A) Résultats des expériences simples sur l'action des alternances de sécheresse et d'humidité.

##### 1. Position des coupes.

Les expériences faites avec un certain nombre de plantes ont montré une variation assez nette de la structure, suivant la période des alternances de sécheresse et d'humidité. Les plantes, aussi semblables que possible au début, ont subi des conditions identiques pour tout leur organisme, sauf pour les portions soumises aux expériences pendant un certain temps de leur croissance. Ces portions ont été ensuite examinées au point de vue de leur structure microscopique dans des régions correspondantes, de façon à éliminer le plus possible l'influence de la position de la coupe. On sait en effet que, pour les tiges, et surtout pour les pétioles, la structure varie d'un point à l'autre de leur longueur.

J'ai fait des coupes dans les pétioles de longueur sensiblement égale, à un centimètre de l'insertion du limbe; les coupes dans les nervures des feuilles ont été pratiquées à deux ou trois centimètres de l'extrémité terminale.

Afin d'éviter tout phénomène d'autosuggestion qui aurait pu fausser inconsciemment mes observations, j'ai affecté chaque échantillon d'un numéro d'ordre sans relation aucune avec le traitement subi; celui-ci était noté sur un répertoire d'ensemble. Les échantillons munis de leur seul numéro d'ordre étaient conservés dans le mélange à parties égales d'eau, alcool, glycérine. Après avoir effectué les coupes, et les avoir dessinées et reportées sur papier calque, le répertoire me permettait de retrouver l'indication du traitement subi; je pouvais ainsi faire toutes les comparaisons utiles avec le maximum de chances d'avoir éliminé les phénomènes subjectifs.

##### 2. Rappel des traitements subis.

Afin d'abrégé les notations, les traitements subis par les portions de plantes sont indiqués, dans ce qui suit, par un numéro selon le tableau de la page suivante.

Il s'agit toujours d'alternances de sécheresse et d'humidité de durée égale; par exemple pour le n° 1, il y a eu un quart d'heure d'air sec, puis un quart d'heure d'air humide, puis un quart d'heure d'air sec, etc.;

pour le n° 2, il y a eu une demi-heure d'air sec, une demi-heure d'air humide, une demi-heure d'air sec, etc. ;

pour le n° 8, trente-deux heures de sécheresse, suivies de trente-deux heures d'humidité, puis trente-deux heures de sécheresse...

Numéro du traitement	Durée de chaque alternance
1	1/4 heure
2	1/2 heure
3	1 heure
4	2 heures
5	4 —
6	8 —
7	16 —
8	32 —

Enfin le n° 0 ne répond à aucun traitement spécial, la portion de plante correspondante ayant poussé dans une éprouvette identique aux autres, mais en communication constante avec l'atmosphère (1).

Je passe maintenant à l'énumération des plantes traitées et aux résultats qu'elles m'ont donnés.

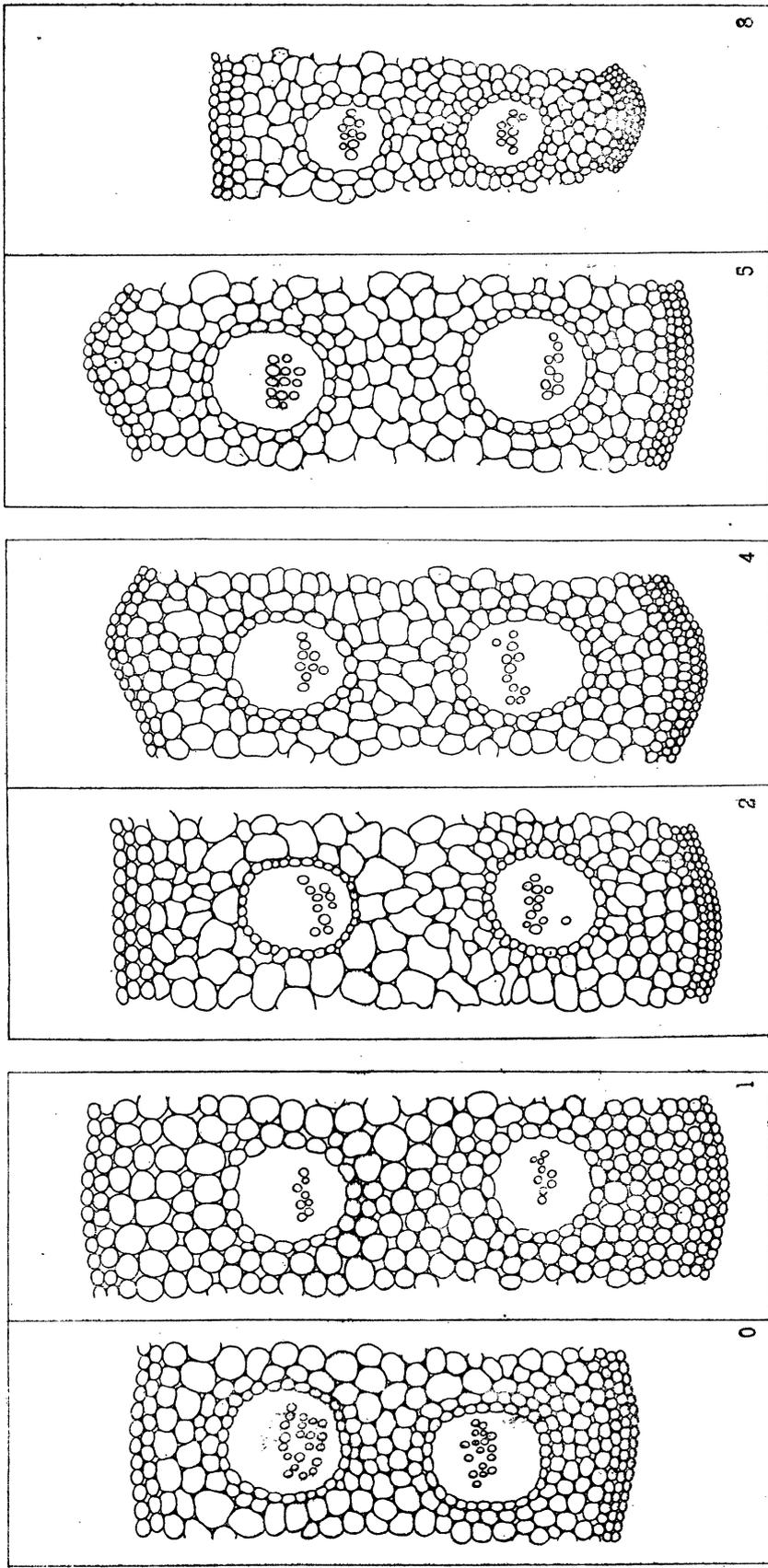
### 3. *Rumex acetosa* L. (fig. XX à XXIV).

J'ai cultivé des plantes recueillies dans la même station. On sait que les *Rumex* peuvent présenter de nombreux hybrides très difficiles à déceler. J'ai donc été amené, les expériences terminées, à conserver, jusqu'à leur fructification, les pieds utilisés, pour faire une comparaison complète des plantes afin de m'assurer de leur identité. C'est ainsi que les échantillons ayant subi les traitements : 0, 1, 2, 4, 5, 8, m'ont paru appartenir à des plantes identiques.

La croissance ayant été rapide, les expériences n'ont duré qu'une quinzaine de jours ; les jeunes feuilles emprisonnées dans les éprouvettes ont plus que doublé de longueur pendant cet intervalle de temps.

Les coupes transversales du pétiole m'ont donné les résultats suivants (sauf indication contraire, les résultats donnés sont en général des moyennes). Les coupes transversales du pétiole (à environ un à deux centimètres de l'origine du limbe) ont été obtenues sur des échantillons qui avaient poussé en longueur dans la proportion de 1 (longueur au début du traitement) à 2,5 et 3 (fin du traitement).

1. Pour abrégé l'exposé, il m'arrivera de parler du traitement n° 0 : il est entendu que cela signifie que l'échantillon correspondant n'a pas subi de traitement spécial quant à l'humidité de l'air.



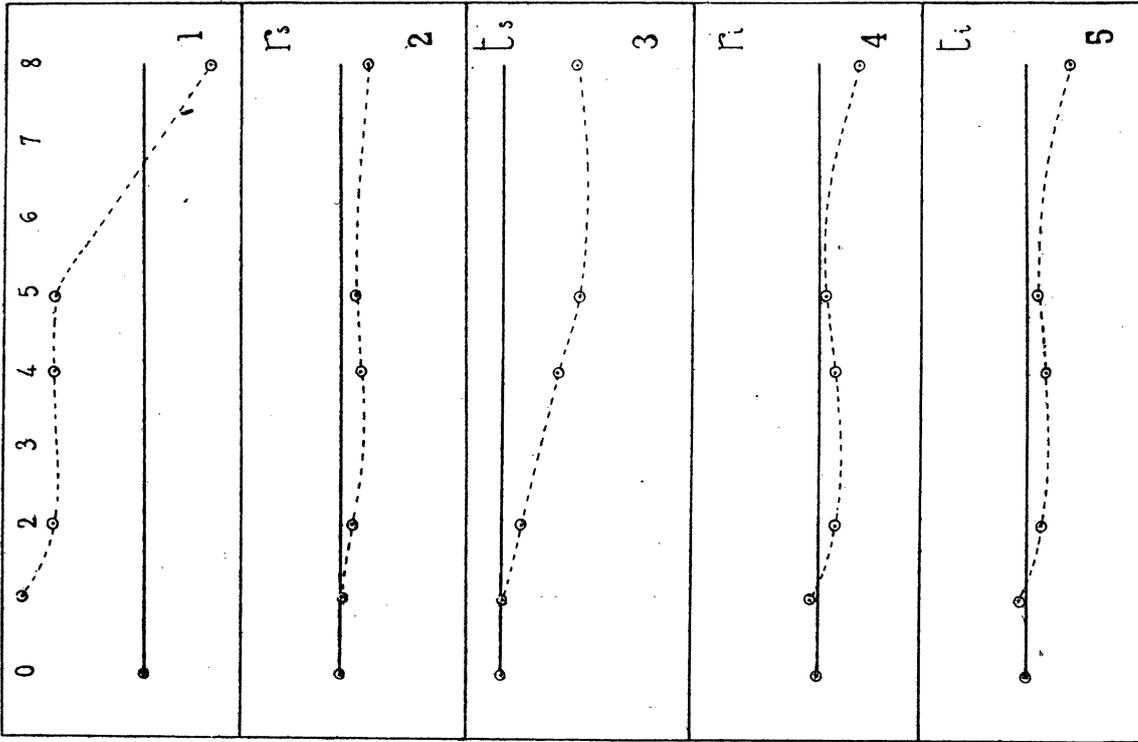
XX

XXI

XXII

FIG. XX à XXII. — RUMEX ACETOSA; COUPES.

Les chiffres indiquent le numéro du traitement.  
 Seule la partie voisine du plan de symétrie de la coupe a été représentée.

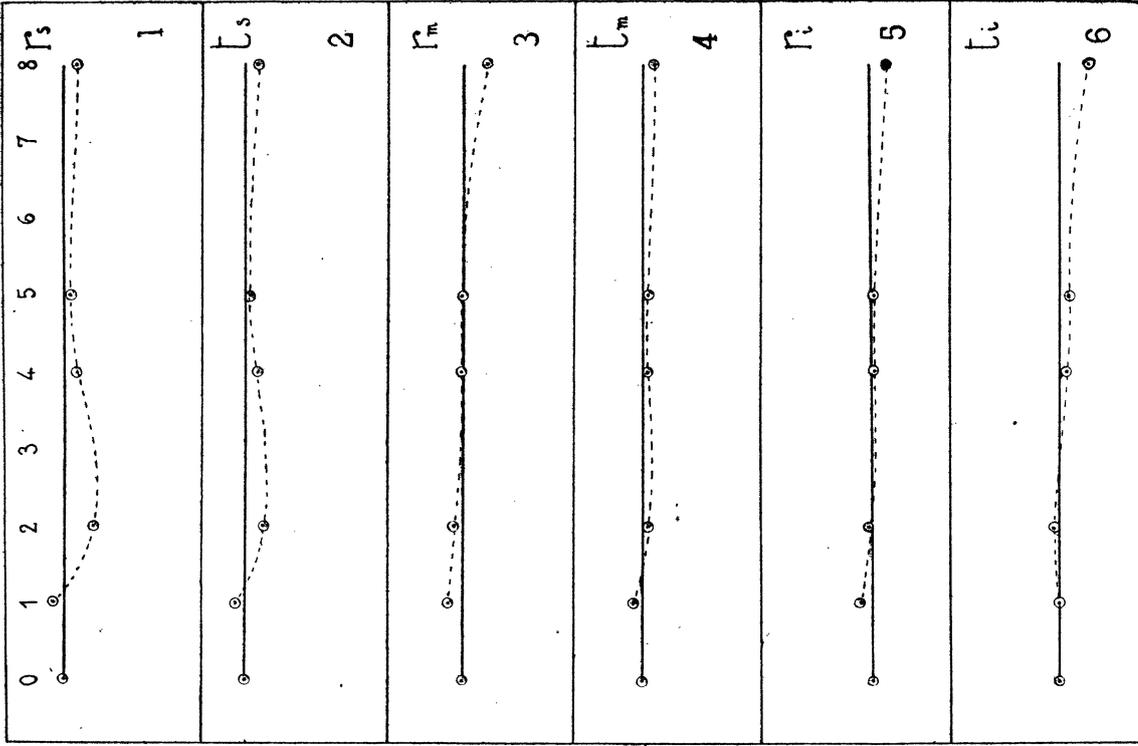


XXIII

En abscisses : numéro du traitement de 0 à 8.

En ordonnées : les dimensions

- 1) épaisseur totale de la section  
 2) dimension totale de l'épiderme :  $r_s$   
 3)  $r_e$   
 4)  $r_m$   
 5)  $r_i$



XXIV

En abscisses : numéro du traitement.

En ordonnées : dimension des cellules

- 1) cellules du parenchyme :  $r_e$   
 2)  $t_e$   
 3)  $r_m$   
 4)  $t_m$   
 5)  $r_i$   
 6)  $t_i$

Fig. XXIII-XXIV. — RUMEX ACETOSA ; COURBES.

Sur les dessins je me suis contenté de reproduire la région située au voisinage du plan de symétrie, les différences notées dans les autres parties de la coupe étant analogues (*fig. XX, XXI, XXII*).

*Épaisseur totale de la section, suivant la direction du plan de symétrie (exprimée en microns) :*

Traitement .....	0	1	2	4	5	8
Épaisseur.....	1.400	1.800	1.700	1.700	1.700	1.200

(*figure XXIII, 1*).

*Dimensions des cellules situées au voisinage du plan de symétrie.*

On distingue sur les figures (*XX, XXI, XXII*) trois zones délimitées par les faisceaux libéro-ligneux : *s* partie supérieure, *m* partie moyenne, *i* partie inférieure. Je donne les moyennes des mesures de plusieurs cellules de chaque zone dans les directions considérées : *r* représentera la dimension moyenne radiale c'est-à-dire suivant le plan de symétrie; *t* représentera la dimension moyenne tangentielle (perpendiculaire au plan de symétrie).

Par exemple : *parenchyme*  $r_m$  représentera la dimension moyenne des cellules suivant le plan de symétrie, dans la partie moyenne de la coupe. De même *épiderme*  $t_i$  représentera la dimension moyenne des cellules de l'épiderme dans la direction perpendiculaire au plan de symétrie, dans la partie inférieure de la figure.

Ces dimensions sont données en microns :

Traitement.....	0	1	2	4	5	8	
Épiderme.....	$\left\{ \begin{array}{l} r_s \dots\dots \\ t_s \dots\dots \end{array} \right.$	30	30	27	24	26	22
	$\left\{ \begin{array}{l} r_i \dots\dots \\ t_i \dots\dots \end{array} \right.$	50	50	44	33	26	27
	$\left\{ \begin{array}{l} r_i \dots\dots \\ t_i \dots\dots \end{array} \right.$	22	24	16	17	20	10
	$\left\{ \begin{array}{l} r_i \dots\dots \\ t_i \dots\dots \end{array} \right.$	30	32	25	23	26	15
Parenchyme....	$\left\{ \begin{array}{l} r_s \dots\dots \\ t_s \dots\dots \end{array} \right.$	64	68	55	60	62	60
	$\left\{ \begin{array}{l} r_m \dots\dots \\ t_m \dots\dots \end{array} \right.$	66	68	60	62	64	62
	$\left\{ \begin{array}{l} r_m \dots\dots \\ t_m \dots\dots \end{array} \right.$	55	60	58	56	56	48
	$\left\{ \begin{array}{l} r_m \dots\dots \\ t_m \dots\dots \end{array} \right.$	58	60	56	56	56	54
	$\left\{ \begin{array}{l} r_i \dots\dots \\ t_i \dots\dots \end{array} \right.$	45	48	46	44	44	40
	$\left\{ \begin{array}{l} r_i \dots\dots \\ t_i \dots\dots \end{array} \right.$	48	48	50	46	46	40

(*fig. XXIII, 2, 3, 4, 5; et fig. XXIV*).

*Faisceaux libéro-ligneux.*

Pour nous rendre compte de leur importance relative nous ferons le rapport de la somme des épaisseurs des 2 faisceaux à l'épaisseur totale de la coupe (suivant le plan de symétrie).

Traitement .....	0	1	2	4	5	8
Rapport .....	0,42	0,31	0,34	0,37	0,37	0,39

(fig. XLIX, 1).

Comme remarque générale dans le cas des *Rumex*, on peut noter que l'échantillon 8 semble avoir particulièrement souffert des périodes de sécheresse prolongée : il est moins bien développé ; les dimensions de l'ensemble sont moindres ; les cellules épidermiques sont plus petites que dans l'échantillon normal ; les cellules parenchymateuses sont à peu près aussi nombreuses que dans l'échantillon normal, mais leurs dimensions sont moindres.

#### 4. Carotte (fig. XXV, XXVI, XXVII).

Les carottes employées ont été obtenues par semis de graines provenant d'une même plante. Les jeunes plantes repiquées(\*) dans des pots et suffisamment développés ont été soumises aux expériences pendant un mois. Leur croissance a été très satisfaisante.

##### *Dimensions absolues des cellules de l'épiderme.*

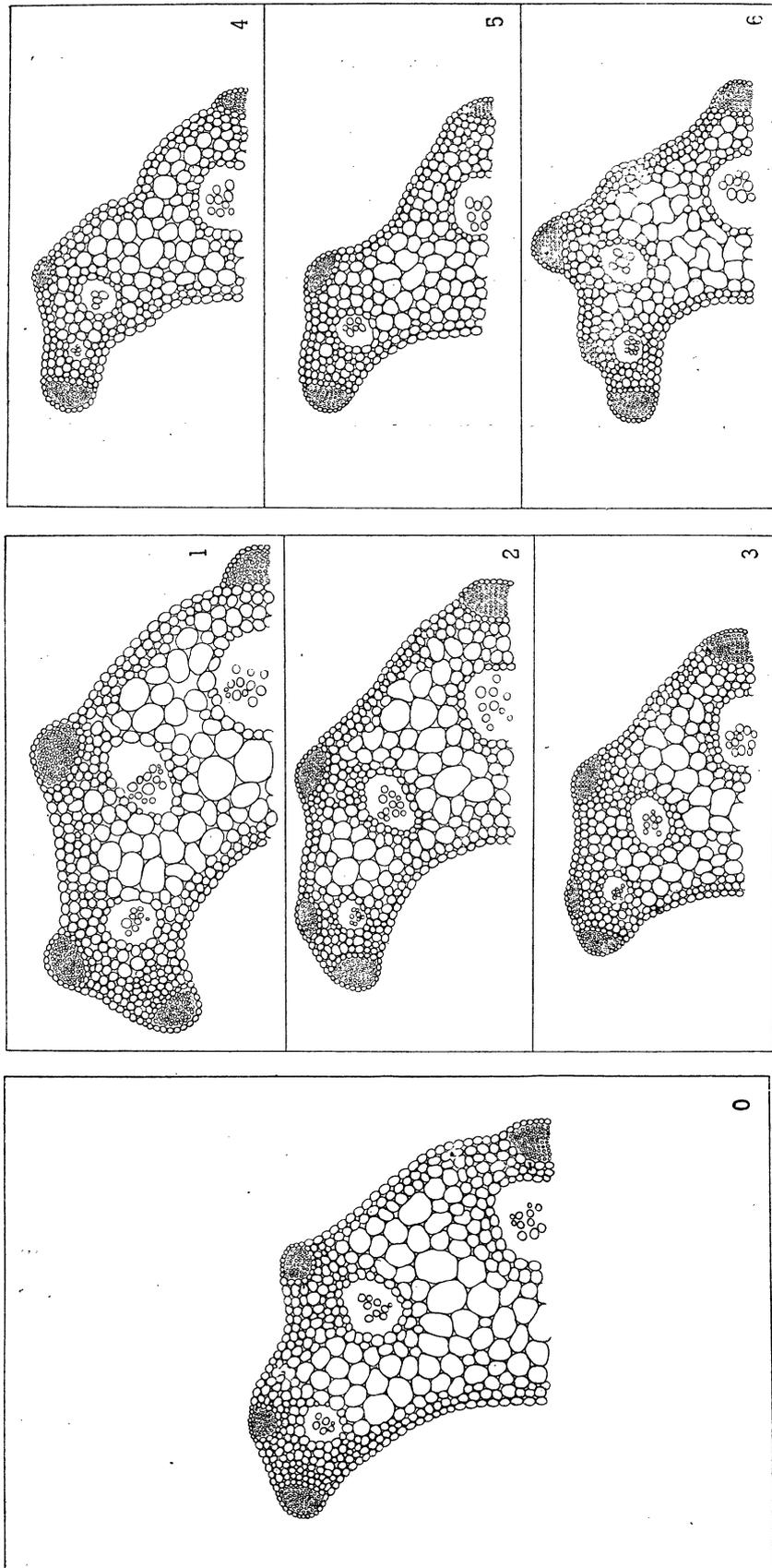
Les coupes montrent que les cellules épidermiques sont relativement développées dans l'échantillon 0 n'ayant pas subi de traitement particulier ; dans l'échantillon 1 elles sont plus petites que dans le type normal ; elles décroissent légèrement pour les échantillons suivants, puis semblent reprendre de l'importance pour les derniers échantillons (traitements 4, 5, 6), (fig. XXV, XXVI, XXVII).

##### *Valeurs relatives des dimensions des cellules de l'épiderme.*

Si on évalue le rapport de la dimension radiale de ces cellules à l'épaisseur du pétiole (mesurée suivant son plan de symétrie) on trouve des rapports différents pour les divers échantillons.

---

2. On n'a pas l'habitude de repiquer les carottes ; cette opération ne se fait pas en horticulture parce qu'elle serait longue et de réussite incertaine. Cependant les jeunes carottes sur qui je l'ai tentée ont parfaitement repris.



XXV

XXVI

XXVII

Fig. XXV à XXVII. — CAROTTE : COUPES.

On n'a représenté que la moitié de la coupe.  
 Les chiffres indiquent le numéro du traitement.

Traitement .....	0	1	2	3	4	5	6
Rapport .....	0,025	0,020	0,020	0,015	0,020	0,025	0,025

Ce rapport diminue d'abord de l'échantillon 1 jusqu'à 3, puis il augmente à nouveau (4, 5, 6).

*Faisceaux libéro-ligneux.*

On trouve que leur importance relative de l'échantillon 1 à l'échantillon 6 décroît d'abord, puis augmente. Si on considère le rapport de l'épaisseur du faisceau principal à l'épaisseur totale du pétiole suivant son plan de symétrie, on trouve :

Traitement .....	0	1	2	3	4	5	6
Rapport .....	0,27	0,33	0,30	0,25	0,27	0,26	0,30

(fig. XLIX, 2).

**5. Taraxacum dens leonis D. C.** (fig. XXVIII, XXIX, XXX).

Dans l'ensemble les cellules de l'échantillon 1 sont plus petites que les cellules correspondantes de l'échantillon 0, mais leur nombre est plus grand; le développement général est plus important. Les *cellules de l'épiderme* semblent en moyenne légèrement plus grosses dans l'échantillon 1 que dans le type. Elles diminuent de 1 à 3, et elles sont légèrement plus développées dans 4 et 5. Le tissu palissadique prend une importance assez régulièrement croissante de 1 à 5. Les lacunes, assez importantes dans 1, diminuent dans la suite des échantillons.

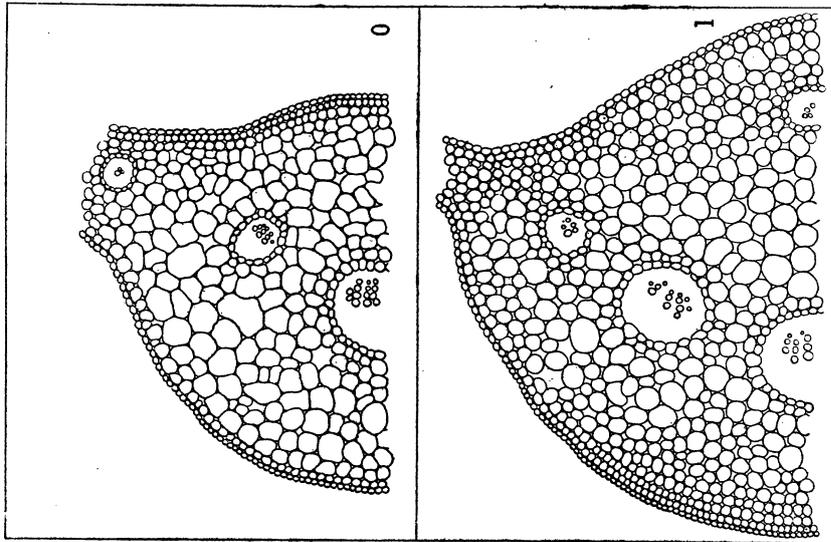
Les dimensions des *cellules parenchymateuses* dans 1 sont inférieures à celles du type, puis elles augmentent très légèrement jusqu'à l'échantillon 4, et enfin diminuent fortement dans 5.

Les *faisceaux libéro-ligneux*, par rapport à l'épaisseur totale de la nervure, nous donnent les rapports :

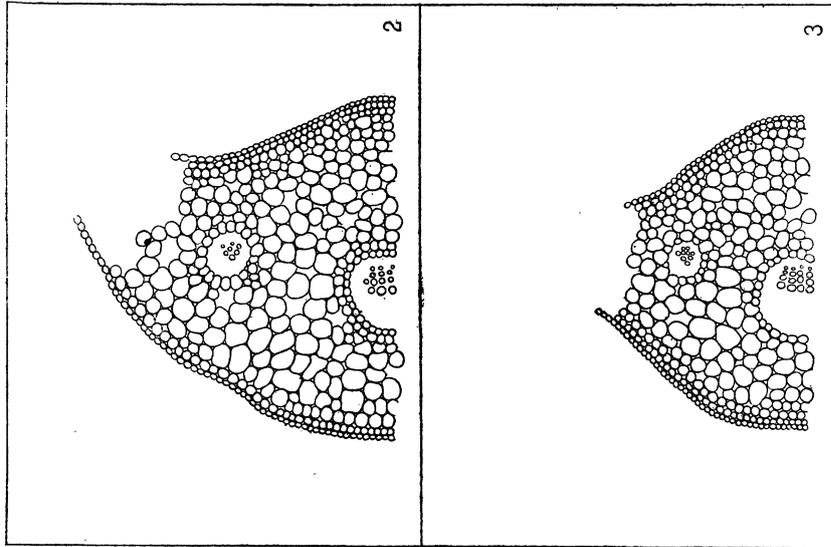
Traitement .....	0	1	2	3	4	5
Rapport .....	0,19	0,15	0,20	0,25	0,24	0,24

Enfin comme aspect général, on peut dire que 4 est assez semblable à 0 sauf que le développement relatif du bois est plus grand.

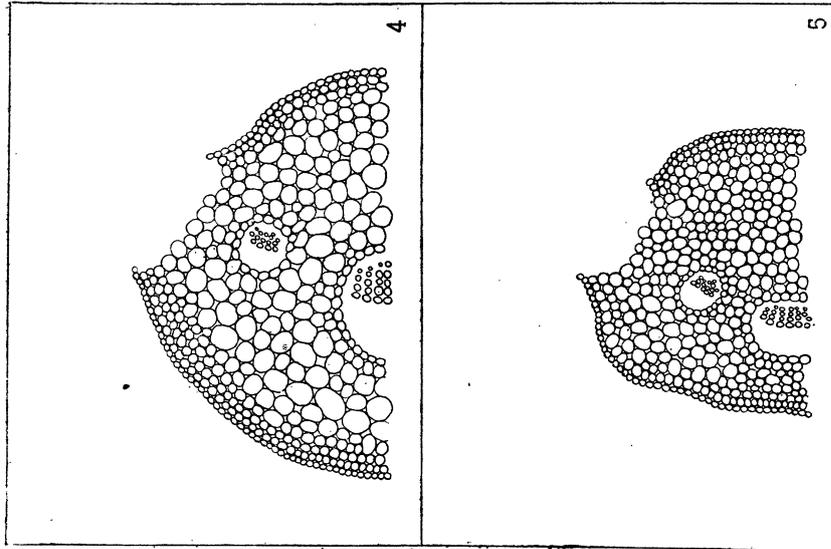
(fig. XLIX, 3).



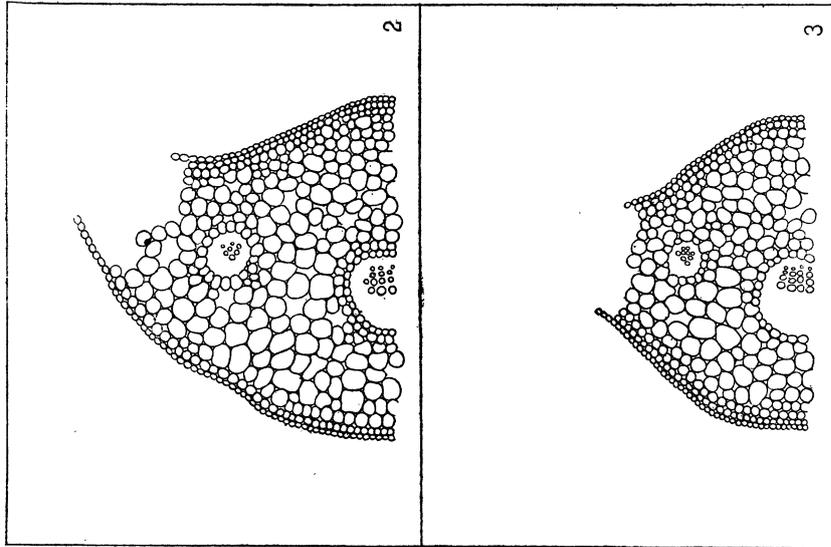
XXVIII



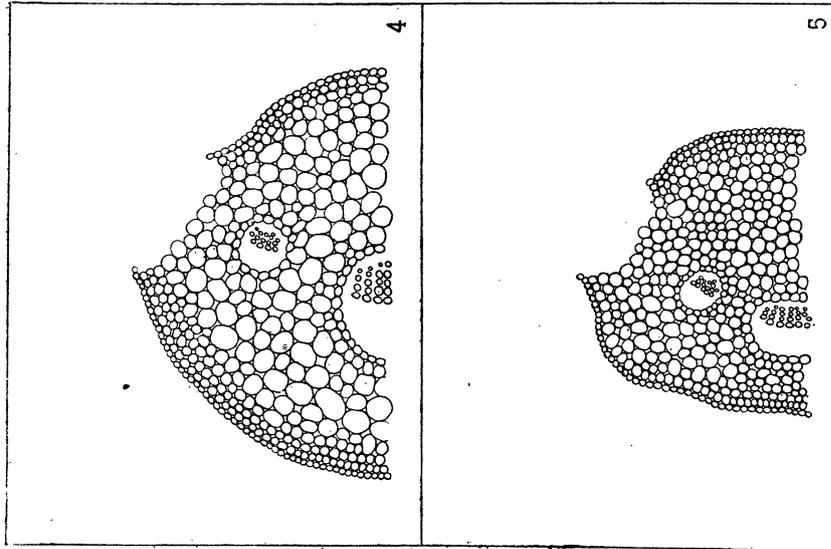
XXIX



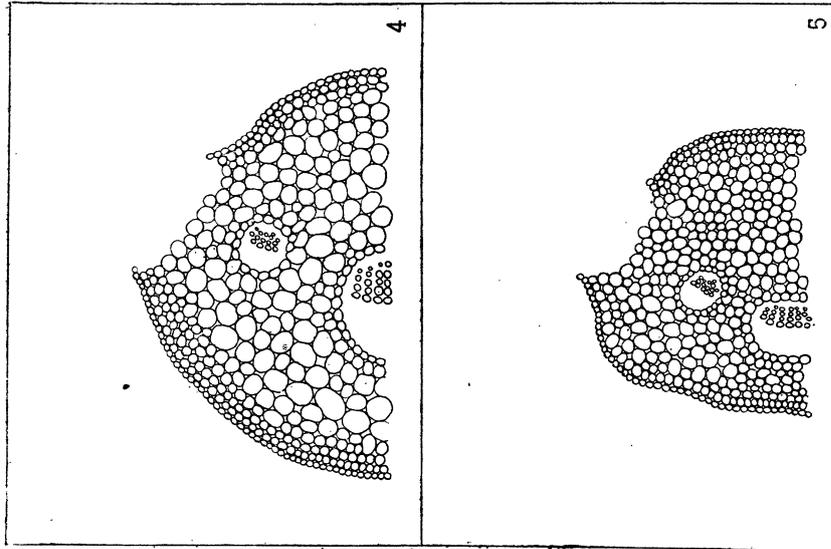
XXX



XXXI



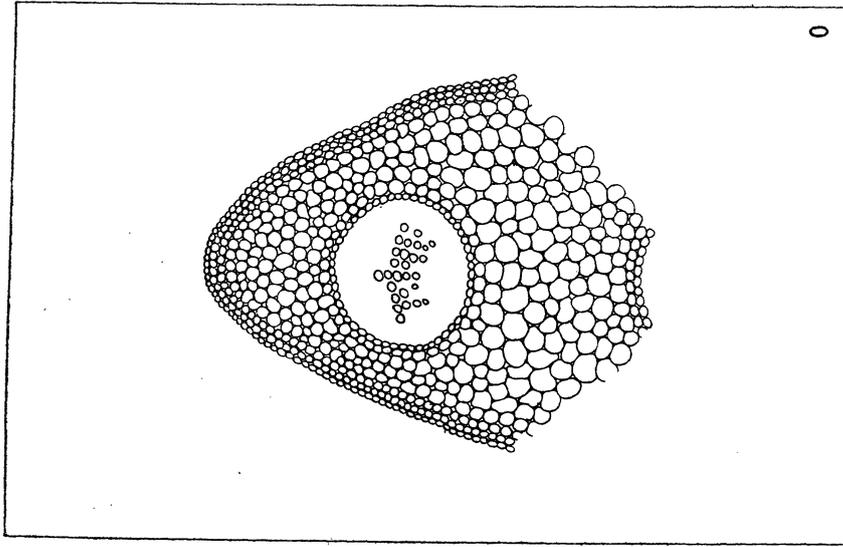
XXXII



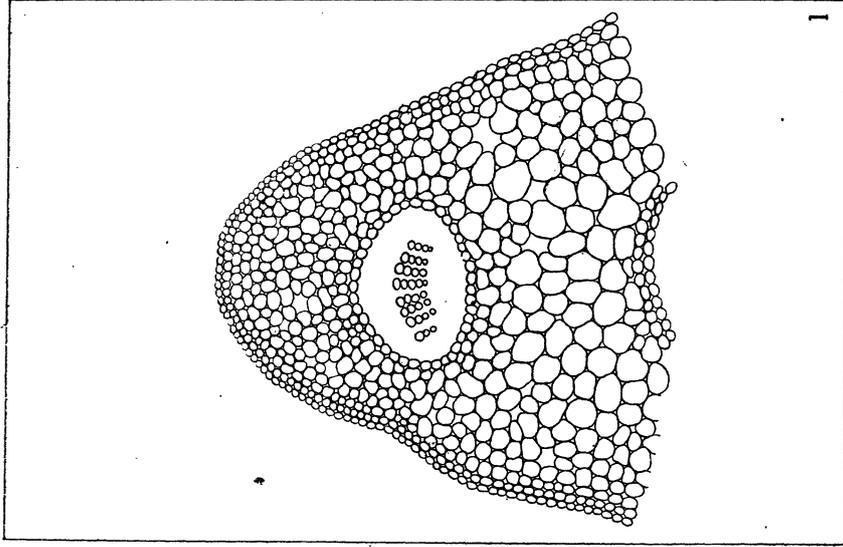
XXXIII

FIG. XXVIII à XXX. — TARAXACUM DENS-LEONIS; COUPES.

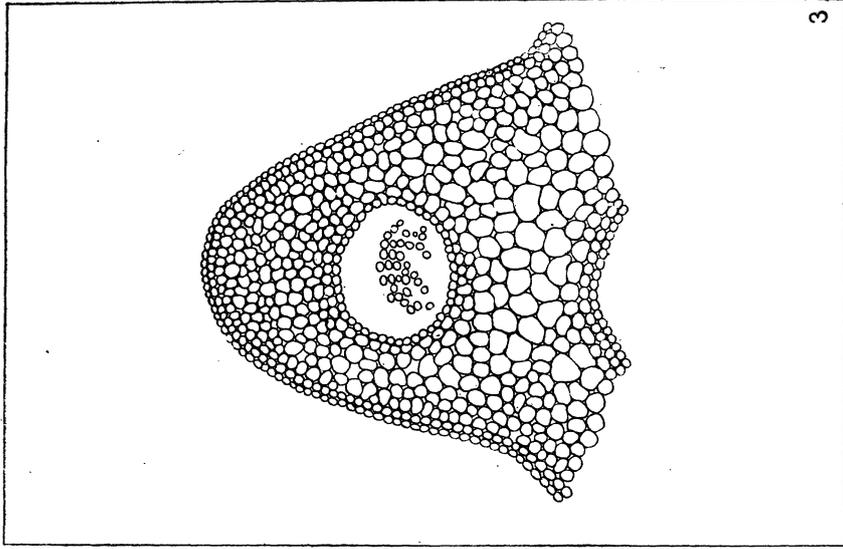
On n'a représenté qu'une portion de la coupe.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XXXII



XXXIII



XXXIV

Fig. XXXII à XXXIV. — *PLANTAGO LANCEOLATA*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.

**6. Senecio erucifolius L. (fig. XXI).**

Le développement de l'ensemble devient moins marqué à mesure que l'on passe de 1 à 7. On peut noter une augmentation des cellules de 1 et 2 par rapport au type.

L'importance relative du bois augmente pour les derniers échantillons, comme le montrent les rapports de l'épaisseur du faisceau libéro-ligneux à l'épaisseur totale de la section :

Traitement .....	0	1	2	4	5	7
Rapport .....	0,30	0,22	0,25	0,25	0,25	0,28

(fig. XLIX, 4).

**7. Plantago lanceolata L. (fig. XXXII à XXXV).**

Les dimensions individuelles des cellules en 1 sont plus grandes que dans le type, puis elles diminuent assez régulièrement de 1 à 8.

Les cellules correspondantes présentent sensiblement les mêmes dimensions pour 1 et 5 ou 7.

Les dimensions relatives du bois par rapport à l'épaisseur de la nervure sont :

Traitement .....	0	1	3	5	7	8
Rapport .....	0,31	0,24	0,26	0,27	0,30	0,35

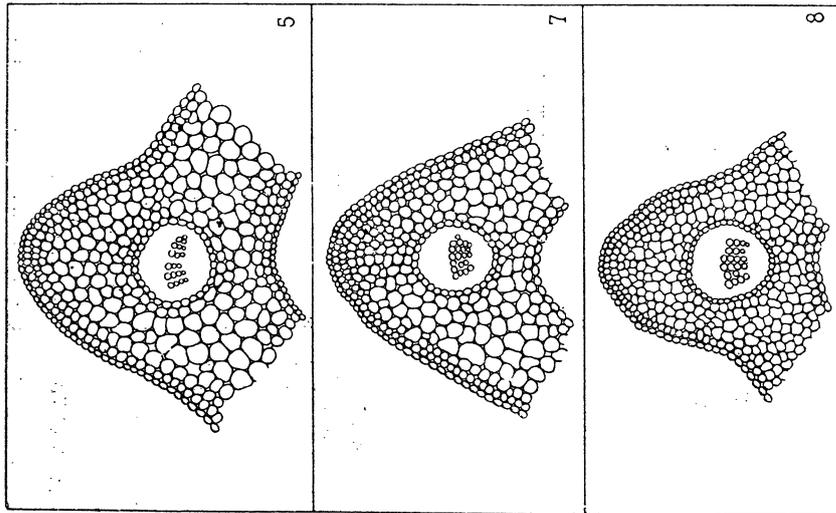
(fig. L, 5).

**8. Plantago capitellata Sonder. (fig. XXXVI).**

Cette variété avait été récoltée en même temps que l'espèce précédente et n'a été déterminée qu'après les expériences, la plante étant restée en observation jusqu'à fructification.

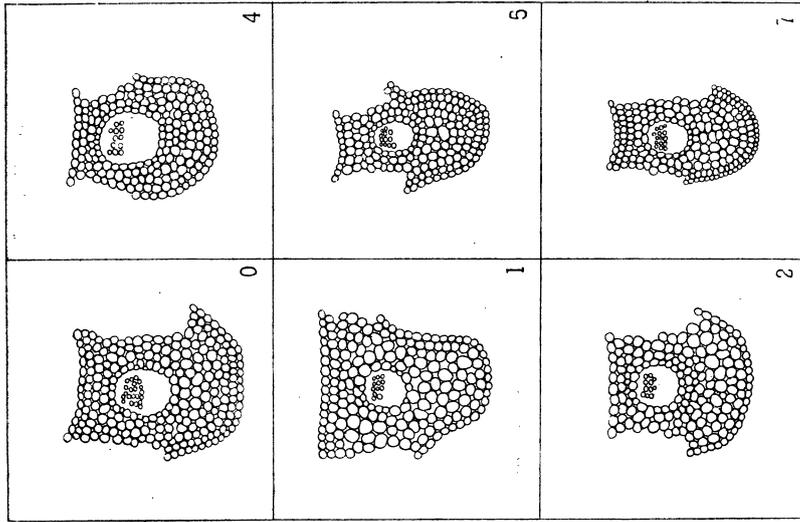
Les traitements subis sont : 0, 2, 4.

On note une diminution des dimensions des cellules ainsi que des dimensions de l'ensemble. Les cellules épidermiques sont plus petites pour 2 que pour 0; elles redeviennent plus grosses pour 4, tout en restant de dimensions inférieures à celles du type.



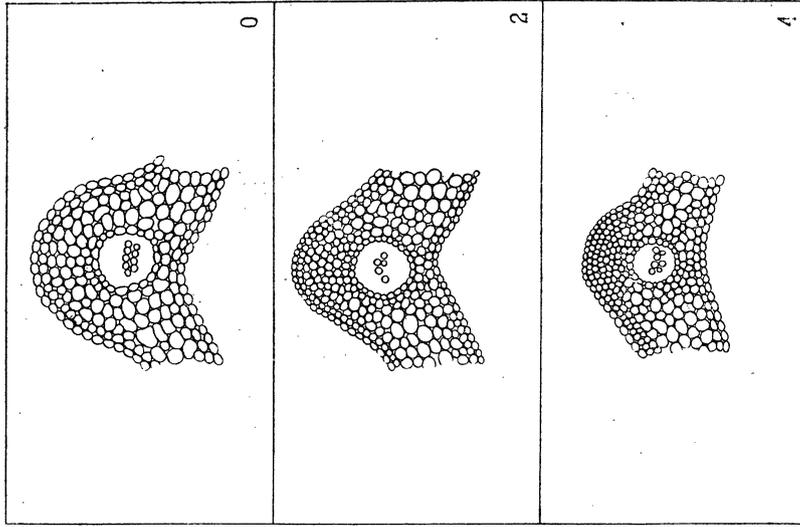
XXXV

Fig. XXXV. — *PLANTAGO LANCEOLATA*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



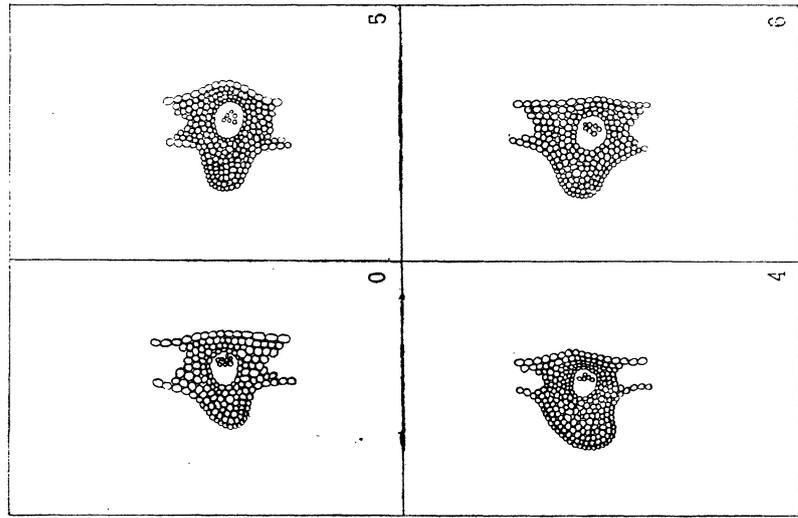
XXXI

Fig. XXXI. — *SENECIO ERUCIFOLIUS*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



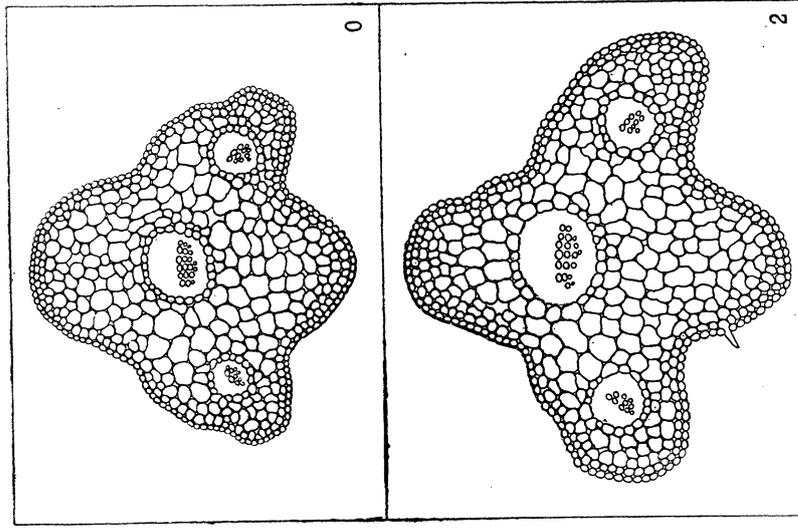
XXXVI

Fig. XXXVI. — *PLANTAGO CAPITELLATA*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



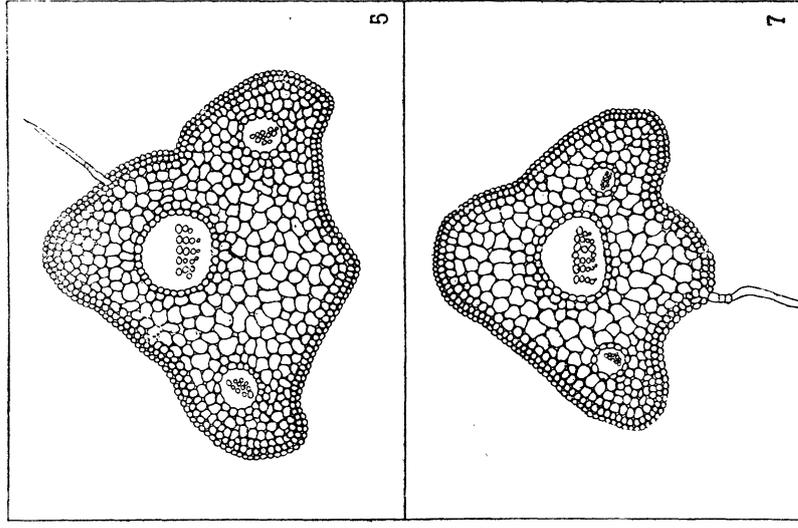
XXXVII

Fig. XXXVII. — *Polygonum aviculare*; coupes.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XXXVIII

Fig. XXXVIII-XXXIX. — *Achillea millefolium*; coupes.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XXXIX

*Épaisseur relative des faisceaux libéro-ligneux.*

Traitement.....	0	2	4
Épaisseur relative.....	0,36	0,32	0,33

**9. Polygonum aviculare L. (fig. XXXVII).**

La fréquence des hybrides et leur ressemblance extrême dans le genre Polygonum m'ont incité à n'opérer que sur les rameaux d'un même pied.

Les traitements imposés ont été : 0, 4, 5, 6. On remarque l'analogie d'allure entre les coupes 0 et 6.

Les cellules des échantillons 4 et 5 sont de dimensions inférieures à celles du type.

*Épaisseur relative des faisceaux libéro-ligneux.*

Traitement.....	0	4	5	6
Épaisseur relative.....	0,32	0,34	0,31	0,32

**10. Achillea Millefolium L. (fig. XXXVIII, XXXIX).**

Les traitements subis sont 0, 2, 5, 7.

On remarque que les cellules décroissent de 2 à 7. Au contraire l'importance relative des faisceaux libéro-ligneux augmente de 2 à 7 comme le montre le tableau :

Traitement.....	0	2	5	7
Épaisseur relative.....	0,18	0,19	0,21	0,22

(fig. L, 6).

**11. Ranunculus bulbosus L. (fig. XL).**

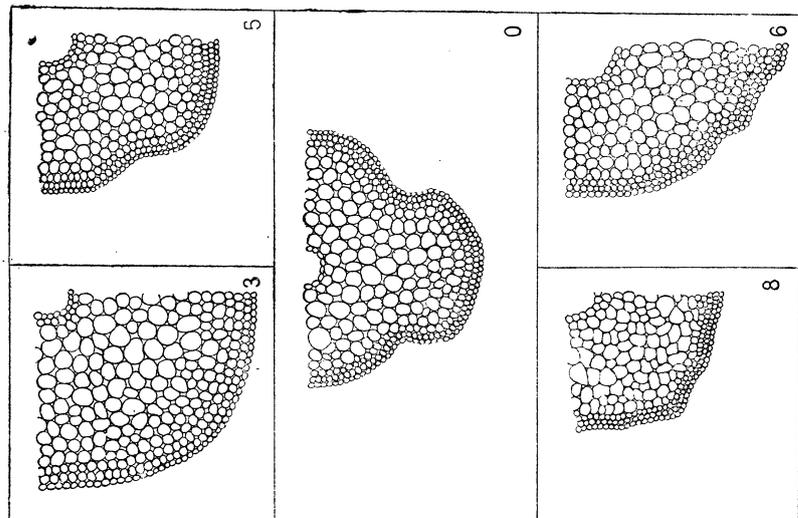
Les traitements subis sont : 0, 3, 5, 6, 8.

On remarque une grande analogie entre 0 et 6 quant à la dimension des cellules et à l'allure de l'ensemble.

Les cellules de 3 semblent de taille légèrement supérieure à celles du type, et sont plus nombreuses.

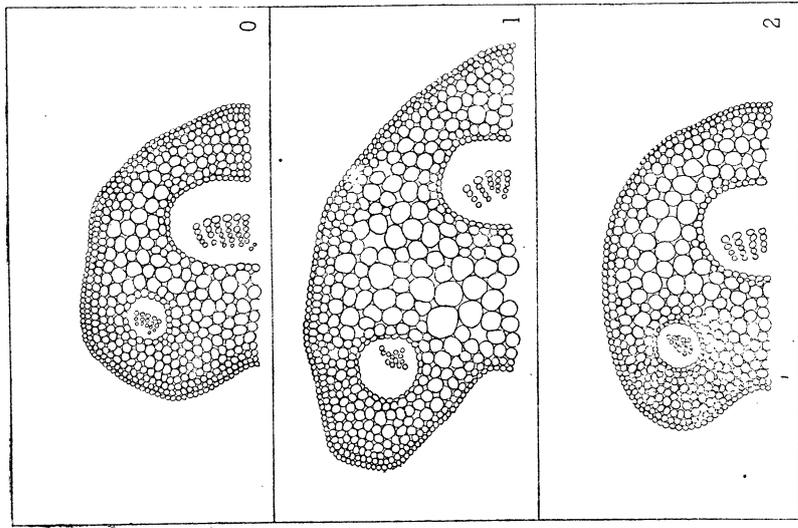
Les dimensions des cellules correspondantes décroissent de 3 à 8.

Les faisceaux libéro-ligneux augmentent d'importance relative de 3 à 8.



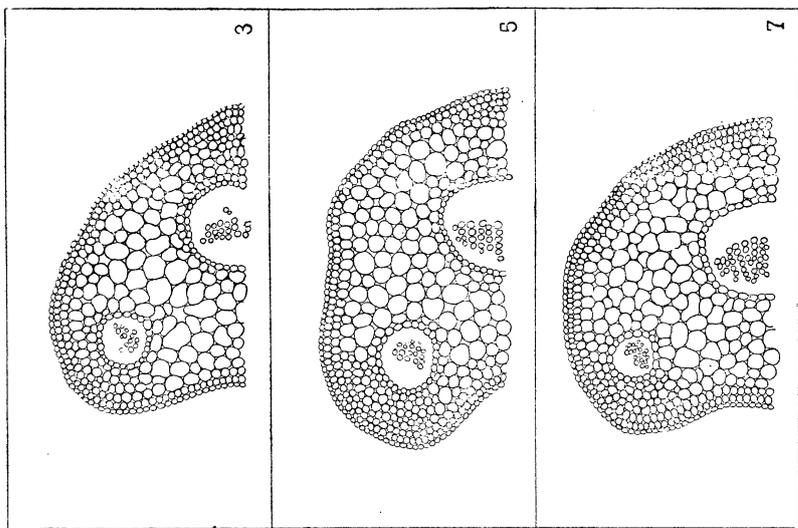
XL

Fig. XL. — *RANUNCULUS BULBOSUS*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XLI

Fig. XLI-XLIII. — *POTENTILLA FRAGARIASTRUM*; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XLII

**12. Potentilla fragariastrum Ehrh. (fig. XLI, XLII).**

Traitements subis : 0, 1, 2, 3, 5, 7.

La coupe 1 est plus développée que le type ; les cellules sont plus grosses.

Dans l'ensemble les cellules correspondantes décroissent de 1 à 7.

*Épaisseur relative des faisceaux libéro-ligneux.*

Traitement.....	0	1	2	3	5	7
Épaisseur relative.....	0,30	0,31	0,29	0,27	0,30	0,33

(fig. L, 7).

**B) Résultats des expériences faisant aussi intervenir le pH.****1. Germination du Radis en atmosphère fortement humide, sans variations.**

La germination exigeant une certaine humidité, il ne pouvait être question de tenter les expériences en atmosphère sèche.

Une série de graines avaient été imbibées de la solution nutritive de pH convenable. Les tubes, contenant chacun quatre graines, avaient été placés sous une cloche en présence d'un cristalliseur plein d'eau, de façon à maintenir l'atmosphère au voisinage de la saturation. Au bout de deux jours, une partie seulement des graines avaient germé. Le nombre des graines germées (sur quatre graines semées) était, suivant le pH, au bout de ces deux jours :

NOMBRE DE GRAINES GERMÉES EN 48 HEURES		
pH	Nombre de graines germées	Longueur des germes
6	0	
6,2	1	court
6,4	2	courts
6,6	2	courts
6,8	4	longs
7	3	longs
7,2	3	moyens
7,4	3	2 moyens ; 1 court
7,6	2	moyens
8	2	1 moyen ; 1 court

Ce tableau nous montre que la vitesse de germination semble plus grande au voisinage de la neutralité.

Au bout de cinq jours d'expérience, toutes les graines avaient germé, toutes les plantules s'étaient développées.

LONGUEUR MOYENNE DES RACINES AU BOUT DE VINGT JOURS :

pH	Longueur de la racine (en cm.)
6	0 <sup>m</sup> ,5
6,2	0,6
6,4	0,4
6,6	1,2
6,8	1,9
7	1,0
7,2	0,9
7,4	1,0
7,6	1,1
8	0,9

*Longueur moyenne des parties aériennes au bout de vingt jours.* Les longueurs des parties aériennes sont souvent nettement différentes entre les quatre plantules du même tube : pour le montrer, on a indiqué dans la troisième colonne du tableau la différence, avec la moyenne, de la longueur qui s'en écarte le plus.

pH	Longueur moyenne en centimètres	Écart maximum avec la moyenne (en valeur absolue)
6	0,9	1,5
6,2	1,2	1,7
6,4	0,8	0,5
6,6	0,9	0,6
6,8	0,9	0,1
7	1,0	0,2
7,2	0,9	0,2
7,4	1,5	1,0
7,6	2,2	1,9
8	0,8	0,4

D'après ce tableau on voit que les *pH* voisins de la neutralité donnent en général des pousses moins développées, mais l'accroissement semble plus homogène, les individus s'écartant moins de la moyenne.

## 2. Influence des alternances de sécheresse et d'humidité sur le développement et la structure des plantules de Radis.

En même temps que la série de graines maintenues en atmosphère constamment humide, deux autres séries avaient été, après imbibition des graines, mises dans des cloches de façon à y subir les traitements n° 4 (2 heures d'air humide et 2 heures d'air sec alternées) et n° 6 (8 heures d'air humide et 8 heures d'air sec alternées).

Le nombre de germes développés au bout de 48 heures de traitement était le suivant : (ce nombre est toujours rapporté à quatre graines ; à titre de comparaison, la colonne *h*<sub>0</sub> correspond à l'humidité constante).

pH	Traitement		
	<i>h</i> <sub>0</sub>	4	6
6	0	0	1
6,2	1	1	3
6,4	2	2	2
6,6	2	3	3
6,8	4	4	3
7	3	2	4
7,2	3	2	4
7,4	3	1	3
7,6	2	2	3
8	2	1	2

On voit encore que le voisinage de la neutralité est favorable à la rapidité de la germination.

Les courbes (*fig. XLVI, 1*) semblent montrer un déplacement de l'optimum dans le sens des *pH* croissants, lorsque l'on passe des traitements *h*<sub>0</sub> à 4 et 6 : l'optimum pour la germination paraît se déplacer vers une légère alcalinité pour des périodes croissantes des alternances de l'air sec et de l'air humide.

Les autres graines ont toutes germé ultérieurement ; les plantules ont été élevées pendant le même temps (vingt jours). La longueur totale des parties aériennes des plantules est résumée dans le tableau suivant :

pH	Traitement	Longueur (en cm.)
6,4	$h_0$	3,2
6,4	4	2,5
6,4	6	5,5
7	$h_0$	4,0
7	4	5,5
7	6	6,4
7,6	$h_0$	8,8
7,6	4	10,3
7,6	6	7,7

Ce tableau semble montrer une tendance à l'augmentation des dimensions pour un pH plus élevé (*fig.* XLVI, 2).

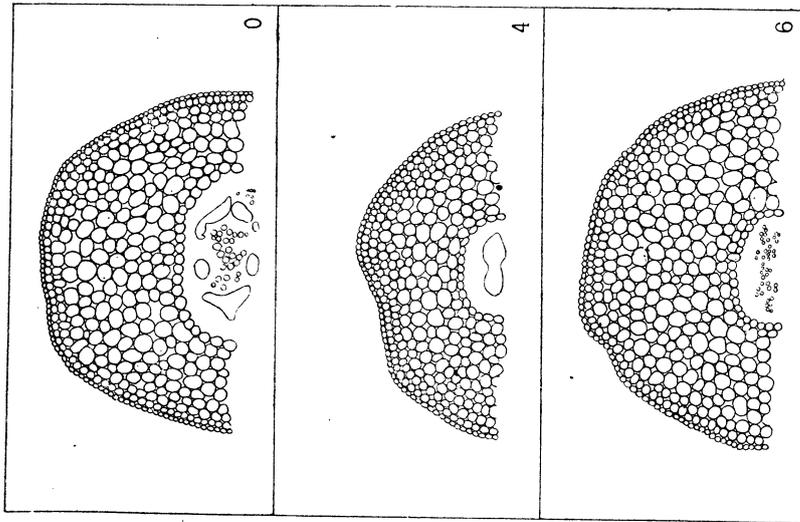
Les coupes ont été faites dans l'axe hypocotylé, vers le sommet. Pour la structure, si l'on compare ces coupes pour les plantules soumises au même traitement (sauf les pH différents) on remarque que les cellules correspondantes paraissent augmenter de dimensions dans le sens des pH croissants.

On peut aussi étudier par comparaison les coupes de plantules ayant poussé sur des sols de même pH, mais dans des atmosphères différentes. Pour un pH égal à 6,4, on trouve que les coupes des plantules ayant subi les traitements  $h_0$  et 6 sont assez semblables comme dimensions générales et dimensions des cellules; celles correspondant au traitement 4 sont moins développées.

Pour  $\text{pH} = 7$ , on voit que  $h_0$  et 6 sont très semblables quant aux dimensions des cellules; 4 et 6 dans l'ensemble sont plus développés que  $h_0$ ; les cellules de 4 sont en général plus grosses.

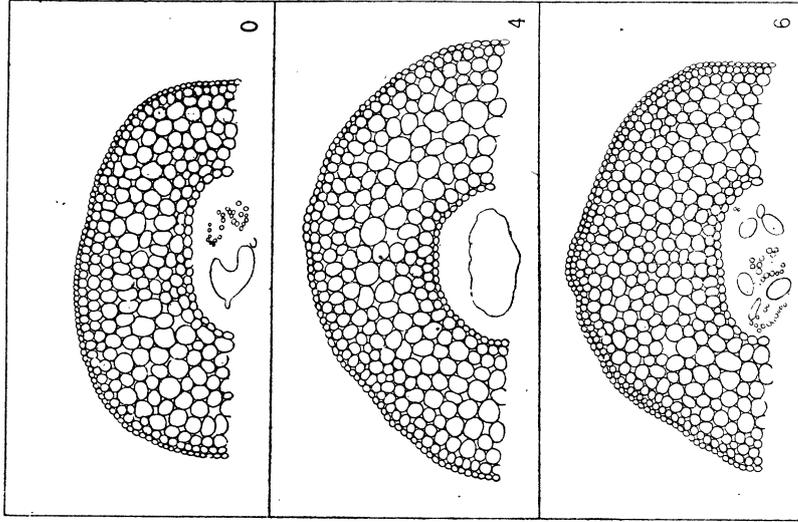
Pour  $\text{pH} = 7,6$  on trouve un développement général à peu près le même pour  $h_0$ , 4 et 6; les cellules de 4 paraissent un peu plus grosses.

Les deux actions superposées sont assez difficiles à dissocier; cependant, en résumé, on trouve une ressemblance marquée entre les structures des plantules qui ont crû sur le même sol; mais l'action des alternances de sécheresse et d'humidité apparaît moins nettement que celle du pH (*fig.* XLIII, XLIV, XLV).



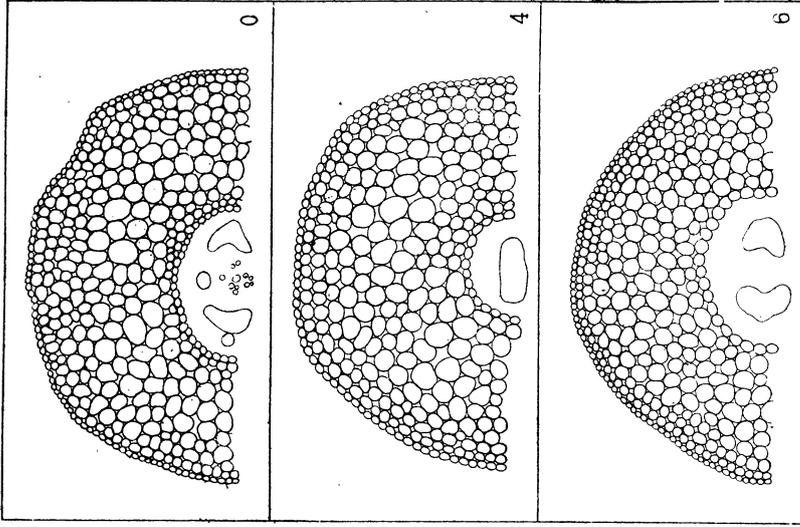
XLIII

FIG. XLIII. — RADIS;  $pH = 6,4$ ; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XLIV

FIG. XLIV. — RADIS;  $pH = 7$ ; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.



XLV

FIG. XLV. — RADIS;  $pH = 7,6$ ; COUPES.  
Les chiffres indiquent le numéro du traitement.

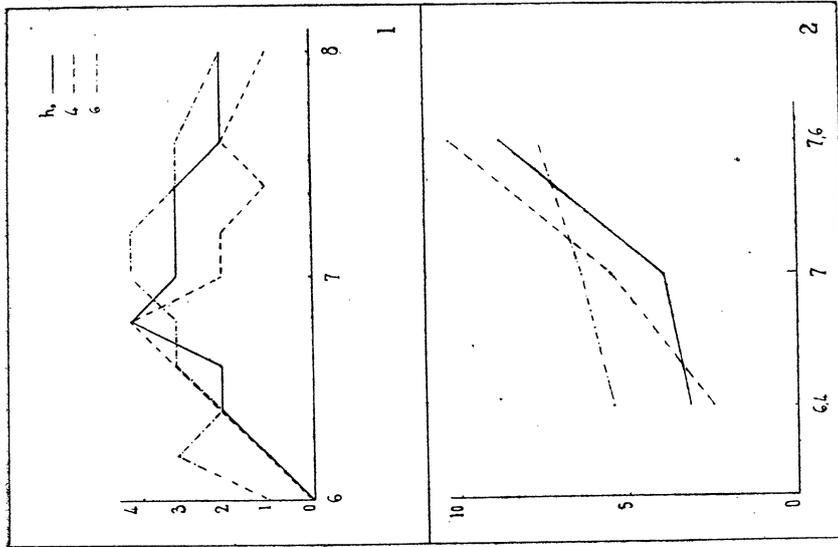
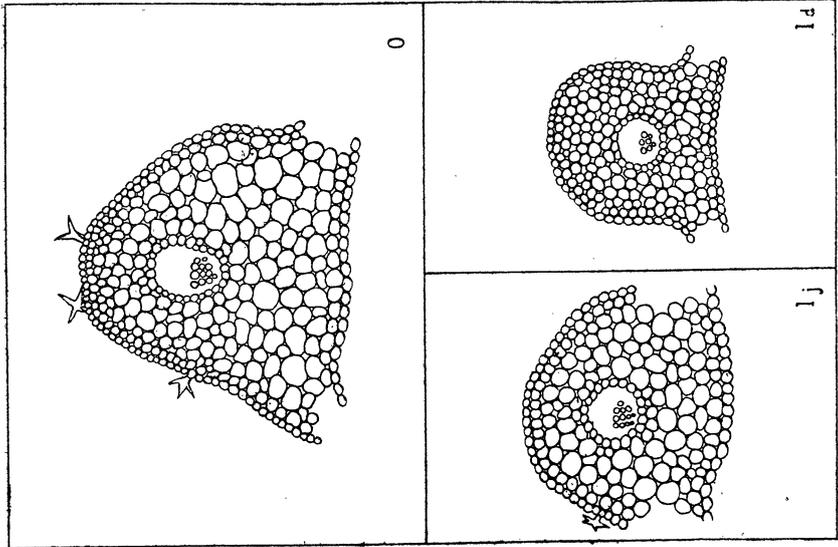


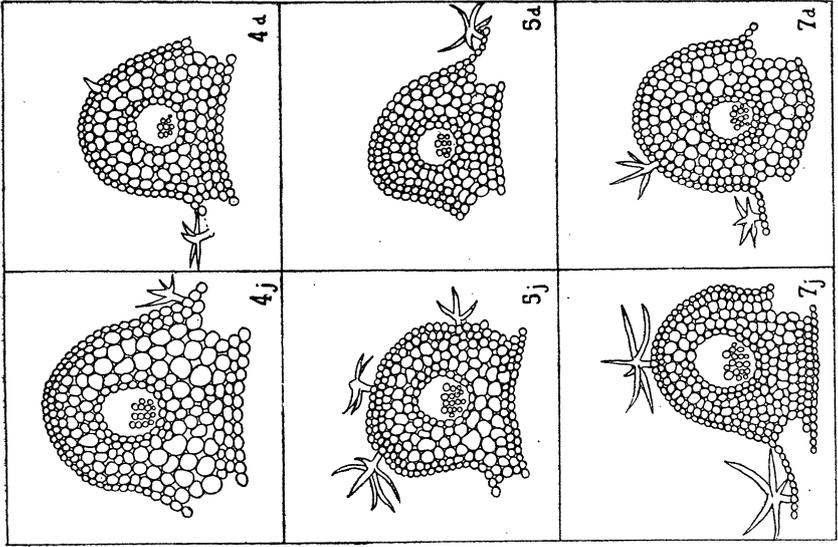
FIG. XLVI. — RADIS; COURBES.

Ces courbes montrent l'action du pH combinée avec les alternances d'humidité et de sécheresse.

- 1) Nombre de germes développés en  $t_0/8$  heures; en abscisses : le pH;
- en ordonnées : nombre de germes développés suivant le traitement  $h_0$ , 4 ou 6.
- 2) Longueur moyenne de la partie aérienne des plantules au bout de 30 jours; en abscisses : le pH; en ordonnées : longueur de la plantule  $h_0$ , trait continu; 4, trait pointillé; 6, trait ponctué.



XLVII



XLVIII

FIG. XLVII-XLVIII. — HIERACIUM PILOSELLA; COUPES.

O, échantillon n'ayant pas subi de traitement spécial, et ayant poussé à la lumière ordinaire; 1j, échantillon ayant subi le traitement 1, à la lumière ordinaire;

1d, échantillon ayant subi le traitement 1, mais à une lumière réduite;

De même pour les autres coupes : le chiffre désigne le numéro du traitement;

la lettre j indique que l'échantillon était à la lumière ordinaire;

la lettre d indique qu'il était à une lumière réduite.

C) Résultats des expériences faisant intervenir l'éclairage.

*Hieracium Pilosella* L.

On sait, que pour cette plante, les espèces élémentaires passent de l'une à l'autre par des séries presque continues d'intermédiaires; heureusement, ces formes sont en général bien délimitées dans une station donnée. J'ai recueilli, dans la même station, un très petit nombre de pieds munis de stolons. Les comparaisons microscopiques avant les expériences, et les observations sur les pieds complètement développés, après les expériences, m'ont prouvé leur identité parfaite.

En plus de l'échantillon type de comparaison 0, ayant reçu l'éclairage normal, les traitements subis ont été 1, 4, 5, 7, avec action d'une lumière plus ou moins intense. Les portions ayant reçu l'éclairage du jour ordinaire, seront désignées par *j*; celles qui ont reçu la même lumière diffusé, réduite au cinquième de l'intensité normale, seront désignées par la lettre *d*.

Si l'on prend séparément les séries : 1 *j*, 4 *j*, 5 *j*, 7 *j*, et 1 *d*, 4 *d*, 5 *d*, 7 *d*, (*fig.* XLVII, XLVIII), on remarque pour chacune d'elles des variations analogues à celles que nous avons déjà rencontrées pour d'autres plantes : les cellules des premiers termes des séries sont peu différenciées; l'importance relative du bois croît à mesure que la période des alternances augmente.

On trouve pour valeurs du rapport de l'épaisseur du faisceau libéro-ligneux à l'épaisseur totale de la section :

	0	1		4		5		7	
Traitement .....	<i>j</i>	<i>j</i>	<i>d</i>	<i>j</i>	<i>d</i>	<i>j</i>	<i>d</i>	<i>j</i>	<i>d</i>
Rapport .....	0,25	0,24	0,23	0,29	0,27	0,34	0,27	0,36	0,30

(*fig.* L, 8).

Les poils étoilés semblent augmenter de dimensions avec la durée des alternances, ce qui est conforme aux résultats antérieurs.

Si l'on compare entre elles les plantes ayant subi le même traitement hygrométrique, on remarque qu'en général la série *d* est moins développée que la série *j* (sauf pour les échantillons n° 7), tant comme dimensions générales que comme dimensions des cellules correspondantes. Les poils de la série *d* sont aussi moins développés que ceux de la série *j*.

## CHAPITRE XI

### Le phénomène inverse de la transpiration : la transsorption.

---

#### 1. Existence du phénomène.

On admet couramment que la plante peut absorber de l'eau, sous forme de vapeur, par ses parties aériennes et l'utiliser<sup>(1)</sup>. L'importance de ce phénomène, qui est en quelque sorte l'inverse de la transpiration, ne semble pas toujours avoir été suffisamment appréciée. Les expériences classiques ont été faites uniquement sur la transpiration proprement dite et sur l'absorption d'eau prise sous forme liquide.

Par exemple on cite d'ordinaire les racines aériennes des Orchidées<sup>(2)</sup>; leur couleur, d'ordinaire grisâtre, devient verte si elles sont mouillées; le revêtement extérieur est formé par plusieurs couches de cellules parfois partiellement lignifiées; les cellules extérieures, mortes sur presque toute la longueur de la racine, constituent le voile absorbant. Il s'agit là d'absorption par les racines. C'est le même cas qui se produit pour les « racines de rosée<sup>(3)</sup> » (Thauwurzeln) de certaines espèces, comme par exemple le Trèfle rouge : il se forme un léger feutre de racines au-dessus du sol, feutre constitué par de minces filaments capables de capter la rosée.

Il semble que les auteurs considèrent le plus souvent l'absorption d'eau liquide plutôt que celle de la vapeur d'eau, lorsqu'ils parlent de l'absorption de l'eau par les parties aériennes des plantes. C'est ainsi que Zamfirescu<sup>(4)</sup> a mené ses expériences avec des liquides (solutions très diluées de citrate et de sulfate de fer, à des concentrations de 1/20.000 et 1/30.000). Il a effectivement constaté la perméabilité des épidermes pour la pénétration de l'eau. Il s'était proposé de déterminer les voies par lesquelles elle peut pénétrer le plus facilement; il recherchait en outre si cette eau était susceptible de parvenir jusqu'aux vaisseaux, c'est-à-dire si elle était réellement

---

1. Cf. GAUSSEN (H.), *Végétation de la moitié orientale des Pyrénées* (Bull. Soc. Hist. nat., Toulouse, 1926).

2. Cf. PLANTEFOL (L.), *Cours de Botanique*, t. I (2<sup>e</sup> éd., Paris, 1938).

3. NOWACKI (A.), in BROCKMANN-JEROSCH (H.), *Die Vegetation der Schweiz*, fasc. 2 (Berne, 1927).

4. ZAMFIRESCU (N.), *Recherches sur l'absorption de l'eau par les organes aériens des plantes* (Bull. Min. Agr., Bucarest, III, n<sup>os</sup> 5-6, 1931).

absorbée. Il a montré que parmi tous les organes aériens, les feuilles étaient ceux qui laissaient pénétrer l'eau le plus facilement; il a montré aussi que cette eau parvenait aisément aux vaisseaux; cette absorption est liée à la présence des nervures et à la perméabilité des parois cellulaires. Les poils interviennent directement s'ils possèdent des parois perméables. Dans les conditions normales, l'entrée de l'eau ne peut s'effectuer par les stomates à cause de l'air qui s'y trouve. La plante peut utiliser l'eau ainsi introduite dans ses tissus: des plantes cultivées en vases sur un sol privé d'humidité se sont développées normalement grâce à de simples pulvérisations aqueuses.

Ces expériences, bien que ne prouvant pas directement l'absorption par les plantes de la vapeur d'eau de l'air, sont cependant intéressantes: elles montrent que si de l'eau arrive à pénétrer dans les tissus, elle sera utilisée par la plante.

Il y a cependant des observations plus anciennes, telles celles de Volkens<sup>(5)</sup>, qui montrent, non seulement l'absorption d'eau liquide par les organes aériens, mais aussi l'utilisation de la vapeur d'eau atmosphérique; il a montré en particulier le mécanisme de résistance à la sécheresse désertique pour certaines plantes: *Reaumuria hirtella*, qui est une tamaricacée des déserts salés d'Égypte et d'Arabie, bénéficie des propriétés hygroscopiques du chlorure de sodium. Pendant la saison sèche, on observe de grand matin que ses feuilles et ses poils épidermiques sont couverts de gouttelettes liquides plus ou moins confluentes. Dans la journée, par suite de l'évaporation intense, ces gouttelettes disparaissent sous un dépôt salin continu; le chlorure de sodium forme alors un revêtement blanchâtre. Pendant la nuit, grâce au refroidissement de la température, le sel peut absorber l'eau atmosphérique. Le contraste des buissons de *Reaumuria*, ruisselants d'eau, avec ce qui les entoure et qui est totalement desséché, est remarquable. Dans ce cas particulier, la captation de la vapeur d'eau atmosphérique se fait extérieurement à la plante, mais dans d'autres cas, l'eau traverse d'abord les parois externes pour être captée par les liquides de la plante fortement concentrés en matières solubles (cf. chap. iv, D, § 3, influence de la concentration sur la tension de vapeur).

D'après les résultats que j'ai obtenus pour les alternances de sécheresse et d'humidité, il m'a paru que le fait d'imposer à la plante pendant un certain temps une atmosphère saturée n'a pas pour seul résultat d'arrêter la transpiration, mais aussi de fournir, dans certains cas, de l'eau à la plante qui en manque.

Il est utile de désigner cette fonction végétale d'une façon aussi précise que possible. Le mot « absorption » est trop général. J'ai pensé que le terme « *transpiration* » rappellerait que le phénomène a quelque chose de la transpiration et de l'absorption. Le terme de « condensation » que j'ai trouvé parfois employé<sup>(6)</sup> doit

---

5. VOLKENS (G.), *Die Flora der aegyptisch-arabischen Wüste* (Berlin, 1887).

6. VAN TIEGHEM, Cours de Botanique.

être de préférence réservé au phénomène purement physique : de même que la transpiration, phénomène physiologique, correspond au phénomène physique d'évaporation, la transsorption, phénomène physiologique, correspondra au phénomène physique de la condensation (\*).

## 2. Explication du phénomène (\*).

Supposons qu'après une période de sécheresse ayant provoqué une déshydratation partielle de la plante, l'atmosphère devienne très riche en vapeur d'eau ; la plante pourra en absorber : si la tension de vapeur correspondant à la concentration du suc cellulaire est inférieure à la tension de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, il passera de la vapeur d'eau dans la plante jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. La vapeur d'eau pénétrera par les stomates (et par la cuticule si celle-ci est perméable), passera, en se condensant, dans les cellules externes, diluant leur suc cellulaire ; cette eau passera ensuite par le jeu des phénomènes d'osmose dans les cellules les plus internes. En maintenant la saturation de l'air extérieur, la transsorption s'arrêtera pour un certain degré de turgescence, si la plante ne consomme pas d'eau ; elle se poursuivra s'il y a consommation d'eau par suite de réactions internes.

## 3. Quelques expériences.

Ce phénomène a souvent été considéré comme négligeable ; cela tient peut-être à ce qu'il est moins frappant que la transpiration. On admet seulement que son action a une certaine importance pour les plantes inférieures (\*), capables d'absorber par toute leur surface.

Cette transsorption m'a paru avoir, même pour les végétaux supérieurs, une plus grande importance que celle qu'on lui attribue. J'ai essayé de la mettre en évidence par des expériences très simples. Une cause d'erreur aurait pu être introduite par la présence de la terre et du pot, ceux-ci pouvant présenter une certaine hygroscopicité : il faudrait utiliser une boîte hermétique, comme celles qui servent à l'étude de la transpiration (cf. chapitre v, § 3, Méthode de Mariotte). J'ai préféré opérer de la manière suivante : comme matériel, j'ai choisi des éléments possédant une certaine indépendance, pommes de terre et plantes grasses. Je les ai maintenues dans l'air très humide, sensiblement saturé, et à la lumière diffuse ordinaire ou à l'obscurité ; pour avoir un terme de comparaison, un sujet restait dans l'air ordinaire, à la lumière diffuse.

---

7. Il peut d'ailleurs y avoir condensation superficielle sans absorption : par exemple la rosée qui se dépose seulement sur les parties nues des feuilles, en particulier sur les nervures, est de l'eau condensée, mais elle n'est pas nécessairement absorbée par la plante. Cf. SACHS, *Notiz über Thaubildung auf Pflanzen* (Landw. Versuchstat., 1861).

8 VAN TIEGHEM, *loc. cit.*

9. Cf. HAGÈNE, *Les facteurs de la végétation*, in *Encyclopédie Française*, t. V.

Je les pesais à intervalles réguliers avec un trébuchet sensible au demi-centigramme.

#### 4. Pomme de terre.

Des pommes de terre, aussi semblables que possible comme race et comme dimensions, avaient « germé », sans terre, à une lumière diffuse forte et à l'air libre.

Cinq de ces tubercules, portant des « germes » de 1 centimètre environ, et étiquetés de A à E, ont été soumis à des pesées régulières.

Dans tous les tableaux de ce chapitre, les masses seront exprimées en grammes.

*Variations de masse avant la mise en expérience* : les sujets étaient abandonnés quelques jours sur des soucoupes à la lumière diffuse et à l'air du laboratoire.

*Masse en grammes des tubercules avant la mise en expérience* :

Temps	A	B	C	D	E
0.....	12,09	10,35	13,40	13,83	14,98
1 jour.....	12,06	10,32	13,36	13,80	14,93
2 jours 1/2.....	11,97	10,22	13,28	13,70	14,85

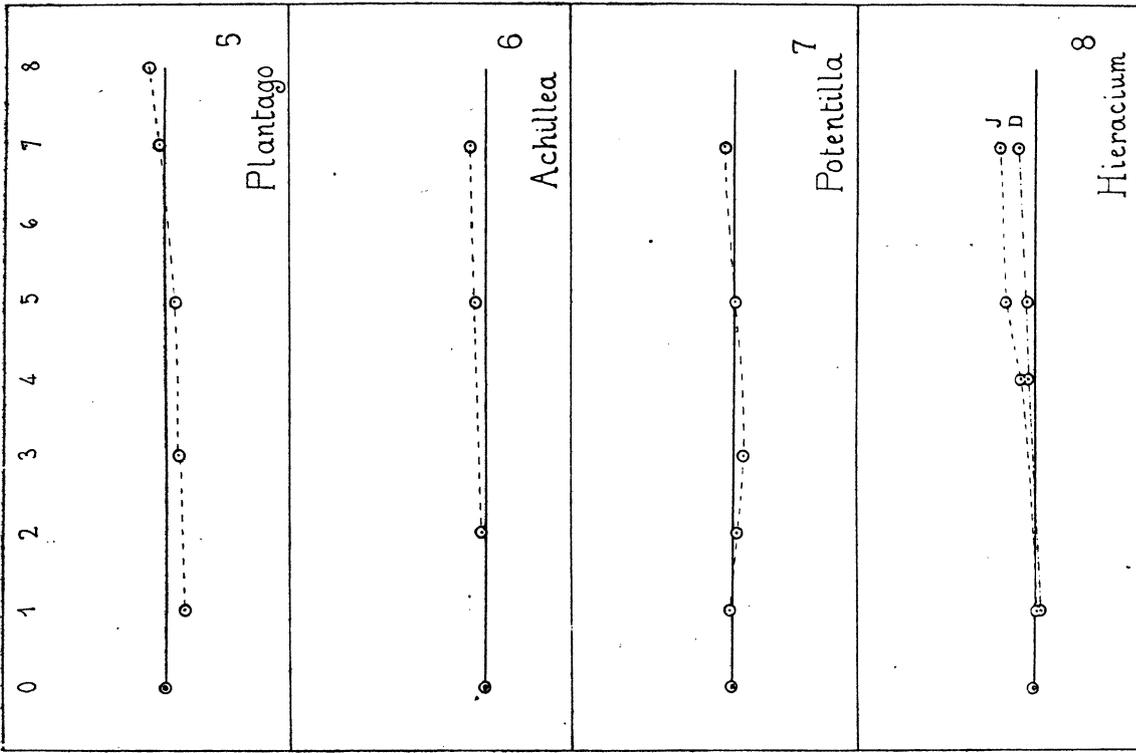
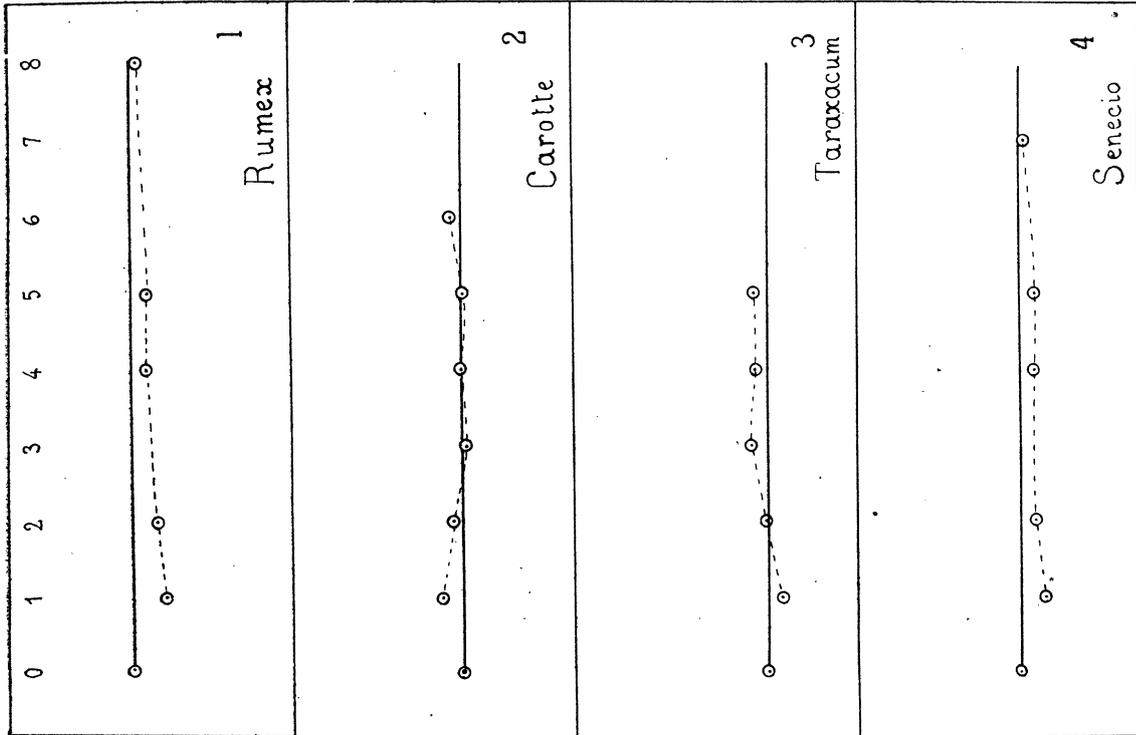
Les conditions étant les mêmes pour tous les échantillons, je n'indiquerai pas les conditions météorologiques, par la suite : ici la première journée avait été pluvieuse et très humide, et la suivante chaude et assez sèche, ce qui explique que la diminution ne soit pas la même d'un jour à l'autre pour le même sujet. Ce qui importe c'est que la diminution reste parallèle entre les divers échantillons.

Les sujets ont été alors soumis au traitement suivant :

A. et B sont placés sous une cloche de verre, avec un cristalliseur plein d'eau, de façon à maintenir l'air au voisinage de la saturation, et placés à la lumière ordinaire diffuse ;

C et D sont placés dans des conditions analogues, mais la cloche est recouverte de carton. Ils sont donc dans l'air saturé et à l'obscurité. Enfin comme comparaison le sujet E est placé sous une cloche semblable aux précédentes, et à la même lumière que A et B, de façon à éliminer l'influence de l'absorption des radiations par le verre, mais il n'y a pas d'eau et la cloche est soulevée de façon à laisser une large communication avec l'atmosphère.

Les pesées sont faites régulièrement et en même temps pour les divers échantillons. Il n'y avait d'autre précaution à prendre, lorsqu'on retirait ou remettait les cloches, que d'éviter la chute, sur les sujets, des gouttes d'eau qui avaient pu se condenser sur le verre.



XLIX

L

FIG. XLIX-L. — COURBES REPRESENTANT L'ÉPAISSEUR RELATIVE DES FAISCEAUX LIBÉRO-LIGNEUX.

En abscisses, le numéro du traitement; en ordonnées, le rapport de l'épaisseur du faisceau libéro-ligneux principal à l'épaisseur totale de la section suivant le plan de symétrie :

1 *Rumex acetosa*; 2 Carotte; 3 *Taraxacum dens-leonis*; 4 *Senecio erucifolius*; 5 *Plantago lanceolata*; 6 *Achillea Millefolium*;

7 *Potentilla Fragariastrum*;

8 *Hieracium Pilosella* (J, échantillons ayant poussé à la lumière ordinaire; D, échantillons ayant poussé à une lumière réduite).

*Variations de masse des sujets pendant le traitement (fig. LI).*

Le temps est noté à partir de la mise en train des traitements. Les masses des plantes sont toujours exprimées en grammes.

Temps en jours	Air saturé éclairage normal		Air saturé obscurité		Air ordinaire éclairage normal	Remarques
	A	B	C	D	E	
0.....	11,97	10,22	13,28	13,70	14,85	
1 j.....	12,03	10,30	13,33	13,72	14,82	
2.....	12,04	10,32	13,37	13,75	14,77	
3.....	12,05	10,38	13,41	13,81	14,72	
4.....	12,05	10,38	13,43	13,84	14,66	
8.....	12,07	10,36	13,48	13,89	14,53	(1)
12.....	12,10	10,36	13,50	13,92	14,36	(2)
18.....	12,13	10,36	13,56	13,99	14,19	
28.....	12,15	10,37	13,56	13,98	13,57	(3)
45.....	12,23	10,41	13,52	13,95	12,60	

*Remarques.*

(1) Au bout de 8 jours, des racines sont nettement visibles sous forme de poils de 1<sup>cm</sup> en divers points des pousses, sur ABCD seulement.

(2) Après 12 jours, les filaments se sont développés davantage sur C et D; beaucoup ont atteint 2<sup>cm</sup>; ils sont plus longs pour C et D que pour A et B, mais ils sont plus minces.

(3) Les filaments continuent à augmenter sur A et B; il y a aussi commencement de tubérisation sur les pousses de A et B.

A la fin du traitement, au bout de 45 jours, la tubérisation est bien marquée sur A et B; les longueurs des pousses sont :

pour A : 2 pousses de 5<sup>cm</sup>; 2 de 3<sup>cm</sup>; 1 de 1<sup>cm</sup>;

pour B : 2 pousses de 5<sup>cm</sup>; 1 de 2<sup>cm</sup>; 3 de 1<sup>cm</sup>.

Des feuilles commencent à se développer nettement sur A (1<sup>cm</sup>), un peu moins sur B.

C et D restent en quelque sorte stationnaires : les longueurs des pousses, le nombre et la longueur des poils absorbants ont cessé d'augmenter; les tubercules se rident.



E semble être resté presque stationnaire depuis le début ; les pousses ont un peu augmenté, mais le tubercule s'est ratatiné.

Si l'on compare les variations de poids, on voit que ce sont les plantes dans l'air saturé et à l'éclairage normal qui ont prospéré. Les échantillons dans l'air saturé et à l'obscurité, après une augmentation rapide au début, ont tendance à perdre de leur poids. Quant à l'échantillon à l'air ordinaire et à la lumière, il a continué régulièrement à diminuer de masse.

Après les expériences, tous les échantillons plantés en pots dans les mêmes conditions ont parfaitement poussé ; cependant l'échantillon E a poussé alors plus rapidement que A et B, qui eux-mêmes paraissaient se développer plus vite et être plus vigoureux que C et D.

*Remarques.* — a) En se reportant au tableau des résultats, on peut voir qu'après quelques jours la transsorption proprement dite s'est compliquée d'une absorption par les racines. Celle-ci doit prendre de plus en plus d'importance avec le développement des poils absorbants ; il est possible que, vers la fin de mes expériences, ce soit l'absorption par les racines qui devienne le phénomène essentiel (Il s'agit aussi en réalité d'une transsorption puisqu'il y a utilisation directe de la vapeur d'eau).

Il se peut d'ailleurs que l'action des poils absorbants se fasse sentir avant qu'ils soient visibles.

L'influence des racines pourrait peut-être expliquer que les courbes (*fig. LI*) relatives à AB et à CD tendent à se rapprocher de plus en plus au bout d'un temps assez long.

b) Au sujet de ces courbes on voit que, pour les trois premiers jours, la courbe AB est au-dessus de la courbe CD ; ensuite elle passe nettement au-dessous. Tout se passe comme si, au début, la lumière favorisait la transsorption, par augmentation de la perméabilité des parois. Plus tard la transpiration interviendrait jusqu'à un certain point, malgré l'atmosphère quasi-saturée, ce qui explique l'augmentation ralentie de AB par rapport à CD. Le même phénomène semble se reproduire pour *Opuntia* (*fig. LII*), mais il est moins marqué, ce qui peut s'expliquer par la faible perméabilité de la cuticule d'*Opuntia*.

##### 5. *Opuntia inermis* D. C.

Quatre articles, de dimensions semblables, avaient été détachés d'une même plante, au niveau des articulations, et étaient restés plusieurs jours à l'air jusqu'à cicatrisation complète de la section. Ils ont été étiquetés de F à I.

##### *Variations de masse avant la mise en expérience.*

Les articles, dès cicatrisation, ont été abandonnés sur des soucoupes à la lumière diffuse et à l'air du laboratoire.

*Masse en grammes des articles avant la mise en expérience :*

Temps	F	G	H	I
0 .....	26,59	24,26	24,44	20,32
1 jour 1/2 .....	26,32	24,02	24,20	20,11
2 jours .....	26,20	23,90	24,08	20,02

Il y a pour tous une diminution de masse progressive.

Les articles sont alors soumis aux traitements suivants (je ne détaille pas le mode opératoire, qui était le même que pour les pommes de terre) :

F et H sont placés dans l'air saturé, mais F à la lumière, et H à l'obscurité ;  
G et I sont placés dans l'air ordinaire, G à la lumière, I à l'obscurité.

*Variations de masse des sujets traités (fig. LII), (l'origine des temps est prise à a mise en marche des traitements ; les masses des articles sont en grammes) :*

Temps en jours	Éclairage normal		Obscurité	
	Air saturé F	Air ordinaire G	Air saturé H	Air ordinaire I
0 .....	26,20	23,90	24,08	20,02
1 .....	26,22	23,78	24,10	19,91
2 .....	26,24	23,61	24,13	19,75
3 .....	26,25	23,48	24,13	19,63
4 .....	26,25	23,31	24,14	19,51
8 .....	26,26	22,88	24,15	19,22
12 .....	26,27	22,57	24,16	19,04
60 .....		20,89		17,74

Au bout de 60 jours, l'échantillon I présentait une jeune pousse de 2 cm.

L'observation du tableau montre encore ici une légère augmentation de masse dans l'air saturé, alors que dans l'air ordinaire il y a diminution continuelle.

Après les expériences, pour vérifier que les échantillons étaient encore bien vivants, ils ont été bouturés : tous ont repris et prospéré.

## 6. Conséquences.

On pourrait objecter à ces expériences que l'augmentation de masse peut provenir de l'absorption du gaz carbonique de l'air.

Mais dans l'assimilation chlorophyllienne, le carbone passe dans des matières organiques, où interviennent les éléments de l'eau. Si l'on ne peut attribuer, exclusivement à l'eau, l'augmentation de masse observée, il est certain qu'elle y prend une large part.

Les expériences précédentes, faites sur des éléments dont la teneur en eau était voisine de la normale, montrent que la transsorption existe; il est probable que sur des plantes ayant subi des pertes d'eau considérables avant la mise en atmosphère saturée, la transsorption serait beaucoup plus importante; elle ne doit pas être négligeable pour des plantes en état de fanaison commençante.

Il est possible qu'elle joue un rôle plus important qu'on ne le pense d'ordinaire, même pour les végétaux supérieurs.

Il est vraisemblable qu'elle se produit la nuit (même s'il n'y a pas de dépôt de rosée apparente) grâce à l'augmentation de l'état hygrométrique de l'air; si elle ne suffit pas à elle seule à compenser les pertes d'eau subies par transpiration pendant le jour, elle en atténue certainement les conséquences.

---

## CINQUIÈME PARTIE

### Conclusion.

---

#### CHAPITRE XII

##### Résumé des résultats essentiels. Quelques conséquences.

##### A) Synthèse des résultats précédents et essai d'interprétation de la structure des plantes alpines.

###### 1. Synthèse des résultats.

a) Si l'on cherche à grouper les résultats précédents et à les comparer, on voit qu'il existe certainement entre eux des différences spécifiques dues aux plantes, mais il existe aussi une allure générale des hygrotopomorphoses qui ne peut provenir d'un simple hasard.

C'est donc sur cette similitude générale que nous insisterons pour essayer de dégager l'influence des alternances de sécheresse et d'humidité.

b) En examinant tous les résultats, nous pouvons faire les remarques générales suivantes :

*Les traitements à courte période (1 et 2) semblent favoriser le développement général, par augmentation des dimensions et du nombre des cellules.*

*Les traitements à longue période (8 et même 7) semblent nettement défavorables dans tous les cas où d'autres facteurs tels que la réduction de la lumière n'interviennent pas.*

*Les traitements à période intermédiaire, bien que modifiant la structure, semblent agir plutôt sur le nombre des cellules que sur leurs dimensions.*

On peut encore remarquer l'analogie frappante entre les échantillons 0 et 6 par exemple, pour la plupart des expériences précédentes.

Après cette vue générale, si l'on examine certains détails, on peut se rendre compte que : *dans l'ensemble, il y a tendance à la diminution des cellules de l'épiderme à mesure que la période devient plus longue.*

*Il semble également qu'il y ait tendance à la diminution du nombre et de l'importance des lacunes lorsque la période s'allonge.*

*Au contraire, l'épaisseur de la cuticule (1) semble augmenter assez régulièrement si la période devient plus longue.*

*Le tissu en palissade semble également prendre plus d'importance, tant au point de vue de l'épaisseur que du nombre des couches, à mesure que la période devient plus longue. Les cellules se différencient davantage à mesure de l'allongement de la période ; la pilosité semble également accrue.*

## **2. Comparaison avec la structure des plantes alpines.**

Ce travail avait été entrepris pour contrôler une hypothèse sur une des causes de la structure des plantes alpines.

L'épaississement des organes des plantes alpines pourrait, jusqu'à un certain point, se comparer à l'augmentation d'épaisseur observée pour les courtes périodes, mais il y a des différences notables : la cuticule des plantes alpines est plus nette, ce qui nous conduit à faire le rapprochement avec les longues périodes ; l'augmentation de la pilosité, le développement du tissu en palissade nous conduisent au même rapprochement avec les longues périodes.

*Nous sommes donc amenés à considérer l'action des alternances de sécheresse et d'humidité comme intervenant au moins en partie pour déterminer la structure dans le climat alpin.*

Nous allons essayer de chercher une relation entre les résultats obtenus, et ceux que donnent l'air constamment sec et l'air constamment humide.

## **3. Comparaison avec les résultats obtenus dans des conditions constantes de sécheresse ou d'humidité de l'air.**

En comparant les résultats fournis par ce travail avec ceux des expériences classiques, on remarque qu'une période courte des alternances de sécheresse et d'humidité semble exercer une action morphogène analogue à celle de l'air constamment saturé : croissance plus active, augmentation des dimensions des cellules épidermiques ; diminution de la cuticule, de l'allongement des cellules du tissu palissadique et du nombre des assises de ce tissu ; diminution de la lignification et des productions piliformes. Tout se passe comme si l'eau accumulée pendant la phase humide permettait de franchir sans dommage la phase sèche courte.

Au contraire une période longue des alternances de sécheresse et d'humidité semble tendre vers la production d'une xéromorphose : diminution des dimensions

---

1. Mesurée directement au microscope, car elle serait difficile à représenter exactement sur les dessins.

des cellules épidermiques et des lacunes; augmentation du tissu en palissade, accroissement de la lignification et des productions piliformes.

Tout se passe comme si la plante avait à réagir à l'action d'une sécheresse prolongée.

Il était impossible à priori de prévoir dans quel sens aurait lieu la variation. Les résultats de ce travail présentent donc un certain intérêt.

Toutefois, il y a de légères différences : on peut noter que le diamètre des organes a tendance à diminuer dans le cas des longues périodes, alors que dans l'air sec il est fréquemment augmenté; l'importance du bois est diminuée en valeur absolue, bien qu'elle augmente en valeur relative.

#### 4. Essai d'interprétation des résultats dans le cas des périodes moyennes (éclairage normal).

Nous avons déjà noté que les échantillons n'ayant subi aucun traitement particulier présentaient de remarquables analogies avec les échantillons soumis à des alternances de moyenne période. Or si nous examinons ce qui se passe dans les conditions naturelles ordinaires à basse altitude sous nos climats, nous voyons que la plante transpire pendant le jour et cesse de transpirer pendant la nuit<sup>(2)</sup>. C'est à peu près ce qui se passerait si on lui imposait des alternances de sécheresse et d'humidité ayant une période de vingt-quatre heures.

En réalité il y a une différence qui tient au fait que, pendant le jour, dans les conditions naturelles, la sécheresse n'est pas poussée au point où elle l'était dans mes expériences; de même l'humidité, dans mes expériences, dépassait celle qui se rencontre habituellement dans les conditions naturelles.

L'analogie de dimensions de cellules, ainsi que la réduction de l'aire de la section totale de l'organe étudié s'expliquent d'une façon satisfaisante.

#### 5. Essai d'interprétation de la structure des plantes alpines.

a) D'après l'étude comparative des climats à haute et basse altitude que j'ai faite<sup>(3)</sup>, il semble que la *période des variations secondaires* de l'humidité soit plus courte en valeur absolue en montagne qu'en plaine.

Mais il y a un fait dont nous n'avons pas tenu compte, c'est que ces variations, plus courtes en apparence, sont *relativement plus longues* pour les plantes alpines. On sait en effet que la rapidité de la végétation de ces plantes est remarquable; elles accomplissent le cycle de leur vie active en trois mois au maximum, alors que les

2. Peut-être même transsorbe-t-elle pendant la nuit, s'enrichissant en eau aux dépens de l'humidité atmosphérique. Cf. le chapitre XI sur la transsorption.

3. Cf. troisième partie, chap. VI et chap. VII.

plantes de plaine mettent beaucoup plus de temps. Il est logique de supposer que l'influence d'alternances d'humidité, à une fréquence déterminée en valeur absolue, n'est pas la même si la plante se développe avec une certaine vitesse ou si elle se développe avec une vitesse double; la durée relative des périodes aurait été deux fois plus longue dans le dernier cas. Si les plantes de plaine et celles de l'étage alpin étaient soumises aux mêmes alternances d'humidité, les plantes alpines devraient présenter une structure correspondant à une période plus longue.

D'autre part, l'amplitude des variations est plus forte en montagne, ce qui tend nécessairement à augmenter les différences de structure.

Enfin nous avons vu (chapitre VI) qu'en montagne il existait souvent deux jours consécutifs de sécheresse, séparés par quelques jours humides; au contraire, à faible altitude, les jours secs sont généralement isolés et séparés par de très longues séries de jours humides. Comme les intervalles secs de longue durée ont une grande influence, nous trouvons ici encore une cause de différence de structure entre les plantes alpines et les plantes de plaine, avec tendance à la xéromorphose chez les premières.

b) Mais il existe d'autres causes de xéromorphose chez les plantes de montagne.

Nous avons vu (chapitre VII) que l'intensité d'insolation totale augmente environ du quart de sa valeur quand on passe du bas pays au niveau alpin. Mes expériences ont montré que la diminution de l'intensité de la lumière avait pour conséquence de contrebalancer une augmentation de longueur des alternances de sécheresse et d'humidité.

Il y a, en plus de l'augmentation d'intensité, une augmentation de la durée d'insolation qui tend à renforcer son influence.

Mais c'est surtout vers les radiations fortement actives au point de vue chimique que se fait l'augmentation du rayonnement solaire; cela a pour résultat d'accroître les réactions chimiques internes, et par conséquent la consommation d'eau (celle-ci participe en effet aux synthèses: ses éléments contribuent à former, avec le carbone, les composés organiques constitutifs des tissus végétaux). *Le résultat produit équivaut à une augmentation de la transpiration: la concentration du suc cellulaire augmente. Elle augmente pour deux raisons: parce que la consommation d'eau, par suite des réactions internes, est accrue; mais aussi parce qu'à la suite de ces réactions, des composés solubles tendent à s'accumuler dans le suc végétal.*

c) La radiation a aussi une action indirecte. La température du sol pendant le jour s'élève fortement (cf. chapitre VII). La température des touffes de plantes alpines dépasse notablement celle de l'air, ce qui augmente l'évaporation, et par suite la transpiration, pendant le jour.

En plaine, on observe bien une différence de température entre les plantes et l'air, mais elle est relativement moins importante.

d) La vitesse du vent aussi intervient pour augmenter la transpiration des plantes alpines ; son influence, moins importante en général que celle de l'excès de température, vient s'y ajouter et renforcer les actions que nous venons de passer en revue.

*En définitive, la transpiration des plantes en montagne, au moins pendant le jour, est supérieure à ce qu'elle est en plaine.*

e) Donc, pour me résumer, *la structure alpine serait due à une plus longue période relative et une plus grande amplitude des variations de l'humidité atmosphérique, amplitude dont l'effet est accru par l'action du vent et de l'insolation. La lumière, outre son action directe sur l'évaporation, agit indirectement dans le même sens par suite de l'intensification des réactions photochimiques.*

## B) Quelques autres conséquences des résultats précédents.

### 1. Conclusion pratique.

Il est avantageux pour leur développement que les plantes soient soumises à des alternances de faible période. Nous pouvons en conclure qu'il est recommandable de fournir souvent de l'eau aux plantes, plutôt que de leur en donner beaucoup à des intervalles très espacés.

### 2. L'influence du pH du sol sur la croissance et la structure des plantes, comparée à celle des alternances de sécheresse et d'humidité.

L'influence des alternances de sécheresse et d'humidité, si leur période n'est pas trop longue, ne semble pas nettement marquée sur la vitesse de germination des graines.

Le pH du sol présente un optimum, d'ailleurs assez peu accusé, pour la vitesse de germination.

Si on compare entre elles les coupes des plantes ayant subi le même traitement, on constate une tendance à l'accroissement des dimensions des cellules correspondantes dans le sens des pH croissants. Il semble que l'influence de la réaction du terrain soit relativement plus importante que celle de la période des alternances. Il faut remarquer également que l'accroissement en longueur des plantules varie, en première approximation, dans le même sens — dans les limites restreintes, au voisinage de l'optimum, que j'ai considérés pour le pH.

Cela n'est pas nécessairement en contradiction avec les résultats admis : si les plantes peuvent parfaitement vivre dans des milieux de pH très différents, cela ne veut pas dire que leur développement et leur structure soient exactement les mêmes.

### 3. La période des alternances de sécheresse et d'humidité considérée comme facteur écologique.

Les données des observatoires météorologiques sont en général des moyennes correspondant à des lectures faites à heures régulières, et des valeurs maxima et minima pour un intervalle de temps donné.

En particulier les résultats d'observations permettant de calculer le facteur d'évaporation (ou même les résultats de mesures directes de l'évaporation) ne nous renseignent pas sur la période des variations de ce facteur.

Or nous avons vu que cette période avait une influence sur la structure anatomique des plantes; il est légitime de penser que cette influence s'exerce aussi sur la croissance d'ensemble de la plante.

Supposons deux climats donnant les mêmes valeurs moyennes pour le facteur d'évaporation, et en outre des valeurs égales pour les maxima et minima de ce facteur. Nous avons vu que de courtes périodes tendaient à donner des hygromorphoses, et de longues périodes tendaient à donner des xéromorphoses; il n'est pas absurde d'admettre que, pour le développement général des plantes, les courtes périodes agissent comme des climats plus humides, et les longues comme des climats plus secs.

En particulier si nous comparons deux climats correspondant au même facteur moyen d'évaporation, la période des variations de l'état hygrométrique étant différente pourra entraîner des variations dans les aires de certaines plantes.

#### C) Conclusion.

Le fait de mettre à la disposition d'une plante une certaine quantité de vapeur d'eau dans un temps donné ne détermine d'une façon absolue ni la croissance, ni la structure de la plante. Le rythme suivant lequel cette vapeur est fournie a une importance considérable. Les courtes périodes tendent à produire des hygromorphoses, les longues périodes tendent à produire des xéromorphoses.

Il faut admirer une fois de plus la remarquable plasticité des cellules végétales, qui arrivent à fonctionner dans des conditions aussi différentes, et qui traduisent par leur changement de structure les actions qu'elles ont subies.

## ANNEXE

---

*Table pour le calcul du déficit de saturation, connaissant l'état hygrométrique et la température.*

La première ligne indique les valeurs de  $h$  ;

La première colonne indique les valeurs de  $t_1$  (en degrés C).

Le déficit de saturation est exprimé en millimètres de mercure.

(Voir chap. III, C, § 4.)

Température $t_1$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0.....	4,60	4,37	4,14	3,91	3,68	3,45	3,22
1.....	4,93	4,68	4,44	4,19	3,94	3,70	3,45
2.....	5,29	4,93	4,66	4,50	4,23	3,97	3,70
3.....	5,66	5,38	5,09	4,81	4,53	4,27	3,96
4.....	6,10	5,8	5,49	5,19	4,88	4,58	4,27
5.....	6,53	6,20	5,88	5,55	5,22	4,90	4,57
6.....	6,98	6,63	6,28	5,93	5,58	5,24	4,89
7.....	7,50	7,13	6,75	6,38	6,00	5,63	5,25
8.....	8,02	7,62	7,22	6,82	6,42	6,02	5,61
9.....	8,60	8,17	7,44	7,31	6,88	6,45	6,02
10.....	9,18	8,72	8,66	7,80	7,34	6,89	6,43
11.....	9,81	9,32	8,83	8,36	7,85	7,36	6,87
12.....	10,48	9,96	9,43	8,91	8,38	7,86	7,34
13.....	11,19	10,63	10,07	9,51	8,95	8,39	7,83
14.....	11,94	11,34	10,75	10,16	9,56	8,96	8,36
15.....	12,73	12,09	11,46	10,82	10,18	9,55	8,91
16.....	13,56	12,88	12,2	11,53	10,85	10,17	9,42
17.....	14,45	13,73	13,01	12,28	11,56	10,84	10,12
18.....	15,38	14,61	13,84	13,07	12,3	11,54	10,77
19.....	16,37	15,55	14,73	13,91	13,10	12,28	11,46
20.....	17,41	16,54	15,67	14,80	13,92	13,06	12,19
21.....	18,50	17,58	16,65	15,73	14,80	13,88	12,95
22.....	19,66	18,68	17,70	16,71	15,73	14,75	13,76
23.....	20,88	19,84	18,79	17,75	16,70	15,66	14,62
24.....	22,18	21,07	19,96	18,85	17,74	16,64	15,53
25.....	23,55	22,37	21,20	20,02	18,86	17,66	16,49
26.....	24,99	23,74	22,50	21,24	19,99	18,74	17,50
27.....	26,50	25,18	23,85	22,53	21,20	19,88	18,55
28.....	28,10	26,70	25,30	23,89	22,48	21,08	19,67
29.....	29,78	28,29	26,80	25,31	23,82	22,34	20,85
30.....	31,56	29,98	28,40	26,83	25,25	23,67	22,09
31.....	33,42	31,75	30,08	28,41	26,74	25,07	23,39
32.....	35,37	33,60	31,83	30,06	28,30	26,53	24,76
33.....	37,43	35,56	33,69	31,82	29,94	28,07	26,20
34.....	39,59	37,61	35,63	33,65	31,67	29,69	27,71
35.....	41,85	39,76	37,67	35,57	33,48	31,39	29,30

Température $t_2$	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0.....	2,99	2,76	2,53	2,30	2,07	1,84	1,61
1.....	3,20	2,96	2,70	2,47	2,22	1,97	1,73
2.....	3,44	3,17	2,91	2,65	2,30	2,12	1,85
3.....	3,67	3,40	3,11	2,83	2,55	2,26	1,98
4.....	3,97	3,66	3,36	3,05	2,75	2,44	2,14
5.....	4,24	3,92	3,59	3,27	2,94	2,61	2,29
6.....	4,54	4,19	3,84	3,49	3,14	2,79	2,44
7.....	4,88	4,50	4,13	3,75	3,38	3,00	2,63
8.....	5,21	4,81	4,41	4,01	3,61	3,21	2,81
9.....	5,59	5,16	4,73	4,30	3,87	3,44	3,01
10.....	5,97	5,51	5,05	4,59	4,13	3,67	3,21
11.....	6,38	5,89	5,40	4,91	4,41	3,92	3,43
12.....	6,81	6,29	5,76	5,24	4,72	4,19	3,67
13.....	7,27	6,71	6,15	5,60	5,04	4,48	3,92
14.....	7,76	7,16	6,57	5,97	5,37	4,78	4,18
15.....	8,27	7,64	7,00	6,37	5,73	5,09	4,45
16.....	8,81	8,14	7,46	6,78	6,10	5,42	4,75
17.....	9,39	8,67	7,95	7,23	6,50	5,78	5,06
18.....	10,00	9,23	8,46	7,70	6,92	6,15	5,38
19.....	10,64	9,82	9,00	8,19	7,37	6,55	5,73
20.....	11,32	10,45	9,58	8,71	7,83	6,96	6,09
21.....	12,03	11,51	10,18	9,25	8,33	7,40	6,48
22.....	12,78	11,80	10,81	9,83	8,85	7,86	6,88
23.....	13,57	12,53	11,48	10,44	9,40	8,35	7,31
24.....	14,42	13,31	12,20	11,09	9,98	8,87	7,76
25.....	15,31	14,13	12,95	11,78	10,60	9,42	8,24
26.....	16,24	14,99	13,74	12,50	11,25	10,00	8,75
27.....	17,23	15,85	14,58	13,25	11,93	10,60	9,28
28.....	18,27	16,86	15,46	14,05	12,65	11,24	9,84
29.....	19,36	17,87	16,38	14,89	13,30	11,91	10,42
30.....	20,51	18,94	17,36	15,78	14,20	12,62	11,05
31.....	21,72	20,05	18,38	16,71	15,04	13,37	11,70
32.....	22,99	21,22	19,45	17,69	15,92	14,15	12,38
33.....	24,33	22,46	20,59	18,72	16,84	14,97	13,10
34.....	25,73	23,75	21,77	19,80	17,82	15,84	13,76
35.....	27,20	25,11	23,02	20,93	18,83	16,74	14,65

Température $t_2$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1
0.....	1,38	1,15	0,92	0,69	0,46	0,23	0
1.....	1,48	1,23	0,99	0,74	0,49	0,25	0
2.....	1,59	1,32	1,06	0,79	0,53	0,26	0
3.....	1,70	1,42	1,13	0,84	0,57	0,28	0
4.....	1,83	1,53	1,22	0,92	0,61	0,31	0
5.....	1,96	1,63	1,31	0,98	0,65	0,33	0
6.....	2,09	1,75	1,40	1,05	0,70	0,35	0
7.....	2,25	1,88	1,50	1,13	0,75	0,38	0
8.....	2,41	2,01	1,60	1,20	0,80	0,40	0
9.....	2,58	2,15	1,72	1,29	0,86	0,43	0
10.....	2,75	2,30	1,84	1,38	0,92	0,46	0
11.....	2,94	2,45	1,96	1,48	0,98	0,49	0
12.....	3,14	2,62	2,10	1,57	1,05	0,52	0
13.....	3,36	2,80	2,24	1,68	1,12	0,56	0
14.....	3,58	2,99	2,39	1,79	1,19	0,60	0
15.....	3,82	3,18	2,55	1,91	1,27	0,64	0
16.....	4,07	3,39	2,71	2,03	1,36	0,68	0
17.....	4,34	3,61	2,89	2,17	1,45	0,72	0
18.....	4,61	3,85	3,08	2,31	1,54	0,77	0
19.....	4,91	4,09	3,27	2,46	1,64	0,82	0
20.....	5,22	4,35	3,48	2,61	1,74	0,87	0
21.....	5,55	4,63	3,70	2,78	1,85	0,93	0
22.....	5,90	4,92	3,93	2,95	1,97	0,98	0
23.....	6,26	5,22	4,18	3,13	2,09	1,04	0
24.....	6,65	5,55	4,44	3,33	2,22	1,11	0
25.....	7,07	5,89	4,71	3,53	2,36	1,18	0
26.....	7,50	6,25	5,00	3,75	2,50	1,25	0
27.....	7,95	6,63	5,30	3,98	2,65	1,33	0
28.....	8,43	7,03	5,62	4,22	2,81	1,41	0
29.....	8,93	7,45	5,96	4,47	2,98	1,49	0
30.....	9,47	7,89	6,31	4,73	3,16	1,58	0
31.....	10,03	8,36	6,68	5,01	3,34	1,67	0
32.....	10,61	8,83	7,07	5,31	3,54	1,77	0
33.....	11,23	9,36	7,49	5,61	3,74	1,87	0
34.....	11,88	9,90	7,92	5,94	3,96	1,98	0
35.....	12,56	10,46	8,37	6,28	4,19	2,09	0



## INDEX ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS CITÉS

	Pages.		Pages.
Abbot (1927).....	163	Dort (1939).....	138, 164
Allard (1932).....	55	Dufour (1887).....	125
Angot (1883).....	163	Eberhardt (1903).....	132, 133
Ashby (1931).....	122	Filzer (1933).....	121
Aubert (1892).....	121	Flahault (1901).....	136
Bénévent (1926).....	136	Gaussen (1926).....	55, 141, 150, 226
Bongards (1926).....	58	(1932).....	174
Bonnier (1892).....	114	(1933).....	118, 136
(1894).....	55, 114	(1934).....	175
(1895).....	54, 114	(1935).....	174
Bonnier et Mangin.....	130	Giroux (1936).....	116, 129
Botticher et Behling (1939).....	120	Götz (1926).....	164
Bouasse.....	54, 58, 81, 89, 93, 101, 107	Goujon (1932).....	136
Bouget (1908).....	137	Guettard (1747).....	120
Boussingault (1873).....	118, 120	(1748).....	115
Braun-Blanquet (1928).....	69	Guinochet (1938).....	180
Brockmann-Jerosch (1927).....	119, 167, 226	Haberlandt.....	121
Bunsen et Roscoe.....	166	Hagène (1931).....	69, 118, 199, 228
Burgerstein (1904, 1920).....	125	Hales (1724).....	115
Chatin (1856).....	113	Hann (1895).....	111, 140
Chodat.....	121	(1908).....	139, 154
Chouard (1933).....	118	Hann-Süring (1926).....	58, 119, 162
(1938).....	165, 170	Härtel.....	121
Clements (1905).....	51, 114	Huber (1925).....	122
Clements et Goldsmith (1924).....	114	(1927).....	115
Combes (1933).....	113	(1934).....	128
Costantin (1884).....	114	Humphreys (1929).....	163, 175
(1886).....	114	Jeffreys (1918).....	110
Dastur (1925).....	130	Killian (1931).....	116
Davis.....	163	(1935, 1936).....	129
Davy de Virville (1927).....	132, 133	Killian et Faurel (1933).....	129
Dehérais (1869).....	120, 121		
Devaux (1938).....	118, 169		

Kleinschmidt (1931) .....	65	Raunkiaer .....	199
Knop .....	200	Sachs (1861) .....	228
Lebedinzewa .....	132, 133	(1868) .....	116
Leclerc du Sablon (1909-1913) .....	124	Salensky (1904) .....	122
(1910) .....	124	Samec (1907) .....	167
(1911) .....	124	Schierbeck (1896) .....	75, 80
Lhotelier (1893) .....	125, 131	Schimper (1898) .....	131
Linke (1931) .....	58, 66, 111	Schröter (1923) .....	119, 154
Livingston (1915) .....	68	Seybold (1929-1930) .....	114
Livingston et Shreve (1921) .....	60	Stahl (1883) .....	114
Lubimenko et Szeglova (1928) .....	55	(1896) .....	120
Lundegårdh (1930) .....	51, 114, 199	Stefan (1871) .....	75
Marchand et Bouget (1904) .....	138	(1874) .....	75
Mariotte (1679) .....	115	(1881) .....	75, 109
Martin et Clements .....	118	Stocker (1923) .....	127
Martonne (de) (1925) .....	161	(1929) .....	116
Maximov (1926) .....	122, 129, 132, 133	Szymkiewicz (1923) .....	119, 154
(1929) .....	122	(1924-1925) .....	75
Mayer .....	125	Tumanow .....	133
Mayer et Plantefol (1925, 1926, 1930) .....	130	Van Tieghem .....	227, 228
Mayr (1928) .....	68	Vesque (1877) .....	117
Mazé .....	200	(1878) .....	126
Mer (1882) .....	113	(1883) .....	114, 121
Molisch (1921) .....	131	Villar (del) (1929) .....	136
Molliard (1921-1925) .....	133	Violle et Margottet .....	164
(1938) .....	51	Volkens (1887) .....	227
Nétien et Quantin (1938) .....	118	Walter (1924) .....	131
(1942) .....	180	(1925) .....	131, 134
Nobbe et Siegert .....	200	(1926) .....	75, 110, 134
Norton (1927) .....	171	(1928) .....	68
Nowacki (1927) .....	226	Warming (1883) .....	121
OEtzig (1940) .....	128	Wiesner (1876) .....	120, 131
Penfound (1931) .....	202	Winkelmann (1884) .....	85
Pisek et Cartellieri (1932) .....	129	(1888) .....	85
Plantefol (1927) .....	52, 55, 107	Wrenger .....	118
(1938) .....	135, 226	Zamfirescu (1931) .....	226

## TABLE DES FIGURES

	Pages.
I Abaque pour le calcul du déficit de saturation .....	73
II Humidité relative au Pic du Midi et à Bagnères-de-Bigorre. — Par saisons. ....	143
III — — — — —	143
IV — — — — —	143
V Humidité relative au Pic du Midi et à Bagnères-de-Bigorre. — Par mois ...	145
VI — — — — —	145
VII — — — — —	145
VIII Photographie de la machine; côté de la minuterie .....	184
IX Photographie de la machine; côté de l'arbre à cames .....	185
X Commande des soupapes .....	189
XI — — — — —	189
XII Commande de l'arbre à cames; au repos .....	189
XIII Commande de l'arbre à cames; fonctionnement .....	190
XIV — — — — —	190
XV — — — — —	190
XVI Minuterie avant réenclanchement .....	194
XVII Minuterie, le ventilateur fonctionnant .....	194
XXVIII Commande du moteur des cames; aspect général .....	194
XIX Commande du moteur des cames; fonctionnement .....	195
XX <i>Rumex acetosa</i> : coupes 0,1 .....	206
XXI — — — 2,4 .....	206
XXII — — — 5,8 .....	206
XXIII <i>Rumex acetosa</i> : courbes .....	207
XXIV — — — — —	207
XXV Carotte : coupes .....	210
XXVI — — — — —	210
XXVII — — — — —	210
XXVIII <i>Taraxacum dens-leonis</i> : coupes .....	212
XXIX — — — — —	212
XXX — — — — —	212
XXXI <i>Senecio</i> : coupes .....	215
XXXII <i>Plantago lanceolata</i> : coupes .....	213
XXXIII — — — — —	213
XXXIV — — — — —	213
XXXV — — — — —	215
XXXVI <i>Plantago capitellata</i> : coupes .....	215
XXXVII <i>Polygonum aviculare</i> : coupes .....	216
XXXVIII <i>Achillea Millefolium</i> : coupes .....	216
XXXIX — — — — —	216
XL <i>Ranunculus bulbosus</i> : coupes .....	218

<b>XXI</b>	<i>Potentilla</i> : coupes .....	218
<b>XXII</b>	— — .....	218
<b>XXIII</b>	Radis; pH = 6,4; coupes .....	223
<b>XXIV</b>	— pH = 7 ; — .....	223
<b>XXV</b>	— pH = 7,6; — .....	223
<b>XXVI</b>	Radis; courbes .....	224
<b>XXVII</b>	<i>Hieracium Pilosella</i> ; coupes .....	224
<b>XXVIII</b>	— — .....	224
<b>XXIX</b>	Courbes : Rapport de l'épaisseur des faisceaux libéro-ligneux à l'épaisseur totale de la section .....	230
<b>L</b>	Courbes : Rapport de l'épaisseur des faisceaux libéro-ligneux à l'épaisseur totale de la section .....	230
<b>LI</b>	Transsorption; Pomme de terre; courbes .....	232
<b>LII</b>	Transsorption; <i>Opuntia</i> ; courbes .....	232

## TABLE DES MATIÈRES DE CE MÉMOIRE

---

### PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

#### CHAPITRE I : Introduction.

	Pages.
1. Complexité du milieu ; impossibilité d'en isoler complètement un être vivant .....	50
2. Les facteurs du milieu .....	50
3. Les variations produites par les facteurs du milieu .....	52
4. Les méthodes d'étude de l'action des facteurs .....	52
5. Peut-on tirer des conclusions valables des expériences physiologiques? ...	53

#### CHAPITRE II : But de ce travail.

1. Influence morphogène de l'action continue ou périodique d'un facteur du milieu .....	54
2. Les alternances de sécheresse et d'humidité .....	55
3. Le problème à résoudre .....	56
4. De quelques divergences dans les formules classiques de l'évaporation ...	56
5. Plan de l'étude présentée dans ce travail .....	57

### DEUXIÈME PARTIE : L'ÉVAPORATION ET LA TRANSPIRATION DES PLANTES

#### CHAPITRE III : Hygrométrie.

1. Objet de ce chapitre .....	58
A) Définitions .....	59
2. Teneur d'une atmosphère en vapeur d'eau .....	59
3. État hygrométrique .....	59
4. Déficit de saturation .....	60
5. Relations entre ces diverses quantités .....	60
6. Masse de vapeur absorbable par un kilogramme d'air sec .....	61
7. Masse d'eau absorbable par un kilogramme d'air humide .....	62
B) Mesures .....	64
1. Classification des appareils de mesure .....	64
2. Hygromètres chimiques .....	64
3. Hygromètres à saturation .....	64
4. Hygromètres à absorption .....	65
5. Hygromètres à condensation .....	66
6. Psychromètres .....	66
7. Évaporimètres .....	68
8. Comparaison sommaire .....	69

C) <i>Expression des résultats</i> .....	70
1. Emploi des tables usuelles de tension de la vapeur d'eau .....	70
2. Emploi de tables donnant le déficit de saturation .....	70
3. Emploi de formules empiriques .....	70
4. Emploi d'un abaque .....	72

#### CHAPITRE IV : Étude de l'évaporation.

1. Objet de ce chapitre .....	74
2. Historique .....	74
A) <i>Étude théorique simple</i> .....	75
3. Formules relatives à la diffusion des gaz et des vapeurs .....	75
4. Diffusion des vapeurs .....	83
B) <i>Généralisation</i> .....	89
1. L'équation de continuité .....	89
2. Expression de la loi de Dalton dans le cas de la diffusion de deux gaz .....	90
3. Expression de la force motrice et application de l'équation de continuité .....	91
4. Cas de l'évaporation .....	92
C) <i>Autre méthode</i> .....	93
1. Les formules fondamentales .....	93
2. Expression des paramètres $K_1$ , $K$ et $K'$ .....	96
3. Cas d'une surface évaporante plane indéfinie .....	97
4. Cas d'une petite surface évaporante plane dans une atmosphère illimitée .....	102
5. Cas d'un cylindre évaporant .....	105
6. Cas d'une sphère évaporante .....	106
D) <i>Influences diverses modifiant l'évaporation</i> .....	107
1. Influence de la pesanteur .....	107
2. Influence de la capillarité .....	107
3. Influence des substances dissoutes .....	108
4. Influence de l'agitation de l'air .....	109
5. Influence de la proximité de plusieurs surfaces évaporantes .....	110

#### CHAPITRE V : La transpiration chez les plantes. Historique sommaire et étude générale.

1. Remarque préliminaire .....	113
2. L'influence du milieu .....	113
3. Définition de la transpiration; principales méthodes d'étude .....	114
4. Les facteurs qui agissent sur la transpiration .....	117
5. Réaction de la transpiration sur les autres fonctions de la plante .....	125
a) Importance de l'eau; ses modes de liaison .....	125
b) Absorption de l'eau .....	126
c) Les divers types phytobiologiques .....	127
d) La pression osmotique .....	129
e) Action sur la respiration .....	130
f) Action sur l'assimilation chlorophyllienne .....	130
g) Action sur l'utilisation des substances de réserve .....	130
h) Action sur la croissance .....	131

6) Action morphogène d'un état hygrométrique sensiblement constant.....	131
a) Humidité maxima : hygromorphoses.....	131
b) Sécheresse maxima : xéromorphoses.....	133

**TROISIÈME PARTIE : INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LES VARIATIONS  
DE L'HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE ET SUR L'ÉVAPORATION.  
CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU CLIMAT PYRÉNÉEN**

**CHAPITRE VI : Les variations de l'humidité de l'air dans les climats de plaine  
et de montagne.**

1. Nécessité d'une étude comparée des variations de l'humidité de l'air en plaine et en montagne.....	135
2. Nomenclature des étages de végétation.....	136
3. Limitation des périodes étudiées. Choix des stations.....	138
4. Établissement des limites des périodes de comparaison approfondie.....	138
5. Généralités sur l'humidité de l'air en montagne, d'après les études de divers auteurs sur les Alpes.....	139
6. Variation, avec l'altitude, de l'humidité relative dans les Pyrénées.....	141
7. L'humidité atmosphérique au Pic du Midi comparée à celle de Bagnères- de-Bigorre.....	142
a) Variation des moyennes saisonnières.....	142
b) Variation des moyennes mensuelles.....	144
c) Variation diurne.....	144
d) Variations de courte durée.....	147
e) Variations de plusieurs jours de « période ».....	149
8. Les extrêmes du climat de montagne.....	150
9. Résumé des observations précédentes.....	151

**CHAPITRE VII : L'évaporation en montagne.**

1. Utilité d'envisager l'évaporation pour caractériser le climat de montagne.	154
2. L'indice d'évaporation de Szymkiewicz.....	154
3. Autre expression de l'indice d'évaporation.....	155
4. Importance relative des différents termes pour le Pic du Midi et pour Bagnères-de-Bigorre.....	155
5. Conséquence : précision avec laquelle les différents termes devront être calculés.....	157
6. Résultats relatifs au Pic du Midi et à Bagnères-de-Bigorre.....	158
7. Autres facteurs à considérer.....	161
8. La pression atmosphérique, la température et l'humidité de l'air en fonction de l'altitude.....	162
9. L'insolation ; le rayonnement terrestre ; la température du sol.....	163
10. La nébulosité et les précipitations en montagne.....	171
11. Le vent en montagne.....	175
12. Mesures directes de l'évaporation.....	176
13. Essai d'appréciation des conditions d'évaporation pour l'étage alpin.....	179

**QUATRIÈME PARTIE : ACTION DES ALTERNANCES  
D'HUMIDITÉ ET DE SÉCHERESSE SUR LA STRUCTURE DES PLANTES.  
INFLUENCE DE LA PÉRIODE DE CES VARIATIONS**

**CHAPITRE VIII : Dispositif expérimental.**

A) <i>Les problèmes expérimentaux à résoudre</i> .....	181
B) <i>L'appareil utilisé</i> .....	182
1. Introduction .....	182
2. Principe de l'appareil .....	183
3. Circulation et conditionnement de l'air .....	183
a) Choix du ventilateur .....	183
b) Tuyauterie de départ du ventilateur .....	186
c) Éprouvettes desséchantes .....	186
d) Éprouvettes humidifiantes .....	187
e) Collecteurs .....	187
4. Distribution .....	188
a) L'arbre à cames .....	188
b) Description d'une section de l'arbre à cames .....	188
c) Commande de l'arbre .....	188
d) Boîtes de départ .....	191
e) Les soupapes et leur commande .....	191
5. Dispositif de commande automatique de l'installation .....	192
a) Minuterie .....	192
b) Modifications apportées à la minuterie .....	192
c) Dispositifs de sécurité et de contrôle .....	196

**CHAPITRE IX : Expériences : mode opératoire.**

A) <i>Marche d'une expérience</i> .....	197
1. Origine des plantes mises en expérience .....	197
2. Contrôle du pH de la terre .....	197
3. Installation des portions de plantes à étudier .....	198
B) <i>Expériences faisant aussi intervenir le pH du milieu</i> .....	199
1. Méthode d'étude de la germination du Radis et du début du développement de la plantule .....	199
2. La concentration en ions hydrogène dans le sol .....	199
3. Mesure colorimétrique du pH .....	200
4. Choix d'une solution nutritive .....	200
C) <i>Expériences faisant intervenir l'intensité de l'éclaircissement</i> .....	202
1. Objet de ces expériences .....	202
2. Les productions piliformes .....	202
3. Mode opératoire .....	203

**CHAPITRE X : Résultats des expériences.**

A) <i>Résultats des expériences simples sur l'action des alternances de sécheresse et d'humidité</i> .....	204
1. Position des coupes .....	204
2. Rappel des traitements subis .....	204

3. <i>Rumex acetosa</i> .....	205
4. Carotte .....	209
5. <i>Taraxacum dens-leonis</i> .....	211
6. <i>Senecio erucifolius</i> .....	214
7. <i>Plantago lanceolata</i> .....	214
8. <i>Plantago capitellata</i> .....	214
9. <i>Polygonum aviculare</i> .....	217
10. <i>Achillea Millefolium</i> .....	217
11. <i>Ranunculus bulbosus</i> .....	217
12. <i>Potentilla Fragariastrum</i> .....	219
B) Résultats des expériences faisant aussi intervenir le pH .....	219
1. Germination du Radis en atmosphère fortement humide, sans variations .....	219
2. Influence des alternances de sécheresse et d'humidité sur le développement et la structure des plantules de Radis .....	222
C) Résultats des expériences faisant intervenir l'éclaircissement .....	226
Hieracium Pilosella .....	226

#### CHAPITRE XI : Le phénomène inverse de la transpiration : la transsorption

1. Existence du phénomène .....	226
2. Explication du phénomène .....	228
3. Quelques expériences .....	228
4. Pomme de terre .....	229
5. <i>Opuntia inermis</i> .....	233
6. Conséquences .....	235

### CINQUIÈME PARTIE : CONCLUSION

#### CHAPITRE XII : Résumé des résultats essentiels. Quelques conséquences.

A) Synthèse des résultats précédents et essai d'interprétation de la structure des plantes alpines .....	236
1. Synthèse des résultats .....	236
2. Comparaison avec la structure des plantes alpines .....	237
3. Comparaison avec les résultats obtenus dans des conditions constantes de sécheresse ou d'humidité de l'air .....	237
4. Essai d'interprétation des résultats dans le cas des périodes moyennes (éclairage normal) .....	238
5. Essai d'interprétation de la structure des plantes alpines .....	238
B) Quelques autres conséquences des résultats précédents .....	240
1. Conclusion pratique .....	240
2. L'influence du pH du sol .....	240
3. La période des alternances de sécheresse et d'humidité considérée comme facteur écologique .....	241
C) Conclusion .....	241
Index alphabétique des auteurs cités .....	247
Table des figures .....	249

## ADDENDA ET ERRATA

---

- P. 122, lignes 22 et 25 : les noms latins en italiques.
- P. 171, 11<sup>e</sup> ligne, *lire* : grand rôle.
- P. 214, 1<sup>e</sup> ligne, *lire* : XXXI.
- P. 238, 9<sup>e</sup> ligne en bas, *lire* : soit presque aussi courte.  
6<sup>e</sup> ligne en bas, *lire* : presque aussi courtes en apparence,  
sont *relativement beaucoup plus longues*.