

Zur Thermodynamik der Trombenbildung

Von G. SWOBODA, Lausanne

Die Tromben sind ein in ihrer äußeren Erscheinung oft und eingehend beschriebenes, hinsichtlich ihrer physikalischen Entstehung aber noch durchaus ungeklärtes Phänomen. Keine der vorhandenen Theorien ist imstande, die Vielfalt der beobachteten Begleiterscheinungen restlos zu erfassen. Zur Wegbereitung einer künftigen Einheitstheorie ist es daher angebracht, sich mit den bisherigen Erklärungsversuchen auseinanderzusetzen. Vor kurzem hat H. KOSCHMIEDER¹ die bekannte hydrodynamische Theorie A. WEGENERS² einer solchen kritischen Betrachtung unterzogen und ihr eine thermodynamische Theorie der Trombenbildung gegenübergestellt.

Nach WEGENERS Auffassung ist die Trombe nichts anderes als das herunterhängende Ende eines im allgemeinen unsichtbaren horizontalen Luftwirbels, der sich in der Mutterwolke — meist einem *Cumulonimbus* (*Cb*) — infolge einer sprunghaften Windzunahme mit der Höhe gebildet habe. Verschiedene Befunde könnten für eine solche Deutung sprechen, so vor allem die häufig beobachtbare Seitenstellung der Trombe im Verhältnis zur vertikalen Mittelachse der Mutterwolke. Andere Tatsachen sprechen dagegen, so z. B. gelegentliche Widersprüche in der Rotation des Wirbelschlauches, die bei — in bezug auf die Zugrichtung der Mutterwolke — linksständigen Tromben im Uhrzeigersinn, bei rechtsständigen im Gegensinn erfolgen sollte; oder der Umstand, daß Paare entgegengesetzt rotierender Tromben, entsprechend beiden herabhängenden Enden eines und desselben Horizontalwirbels, noch nie beobachtet worden sind, und anderes mehr. Überdies kommen Tromben bei Wetterlagen vor, welche keine merkliche Windzunahme mit der Höhe, ja überhaupt keine wesentliche horizontale Luftbewegung aufweisen; dann fehlen aber die kinetischen Eigenschaften des Grundzustandes, aus denen der Horizontalwirbel, hydrodynamisch aufgefaßt, seine Energie schöpfen könnte.

Während der emporquellende *Cb* bei WEGENER nur als *Energieordner* auftritt, indem er die längs der Winddiskontinuität vorhandenen elementaren Gleitwirbel in einen einzigen Horizontalwirbel vereinigt («zusammenrollt»), ist er nach KOSCHMIEDER direkt der *Energiespender* beim Zustandekommen der Trombe; genauer ist es die in der Wolke frei werdende Kondensationswärme. Diese Idee ist schon in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts (von H. MOHN und von TH. REYE) ausgesprochen worden. Damals gab es jedoch noch keine Möglichkeit, die in der je-

weiligen vertikalen Temperaturverteilung vorhandene potentielle Energie zahlenmäßig zu erfassen, welche beim Aufsteigen der Luft in kinetische übergehen kann, unter Einschluß jener, die infolge einer gleichzeitigen Kondensation des Wasserdampfes frei wird (Aerologische T -log p -Diagramme und ihre flächentreuen Transformationen¹). Infolgedessen war damals auch die zentrale Stellung noch nicht bekannt, welche diese sogenannte «feuchtlabile Energie» im Gesamtmechanismus der atmosphärischen Bewegungen einnimmt; sei es nun, daß der genannte Energieumsatz mit vorwiegender Horizontalkomponente und verhältnismäßig geordnet — wie an den zyklonalen Frontflächen —, oder mit vorwiegender Vertikalkomponente und ziemlich ungeordnet — wie bei der thermischen Konvektion (z. B. im *Cb*), vor sich geht¹. Es hat daher eines langen Entwicklungsganges, in seinem Ursprung befruchtet durch V. BJERKNES' exakte Synthese der hydrodynamischen und thermodynamischen Prinzipien in ihrer Anwendung auf atmosphärische Zirkulationen², bedurft, bevor die Idee REYES in KOSCHMIEDERS thermodynamischer Theorie der Trombenbildung neue Gestalt annehmen konnte.

KOSCHMIEDER faßt seine Theorie folgendermaßen zusammen: Durch Überwindung einer schwachen Sperrschicht in oder oberhalb des *Cb* schießt in der darübergelegenen labilen Schichtung ein Luftpaket erheblichen Durchmessers (beispielsweise 100–1000 m) mit großer Geschwindigkeit (z. B. > 20 m/sec) aufwärts. Der dabei auftretende Sog wird statisch nach unten übertragen und eine entsprechende Druckerniedrigung unten aufgeprägt. Dieser große Raum starker Druckerniedrigung stürzt zusammen. Die von der Seite einfallenden Luftmassen erreichen Geschwindigkeiten, die große Bruchteile (Größenordnung $\frac{1}{4}$) der Schallgeschwindigkeit betragen. Das entstehende Stromfeld ist dynamisch nicht stabil; eine kleine Unsymmetrie der Bewegungen vor dem Zusammensturz führt bei dem Zusammensturz zu einer Drehbewegung. Die Drehbewegung erzeugt sofort Zentralkräfte, die dem weiteren radialen Zufluß und damit dem horizontalen Druckausgleich entgegenwirken und die Trombe so lange am Leben erhalten, als die Vertikalbewegungen in der Höhe für hinreichenden Abfluß der besonders am Erdboden einströmenden Luft sorgen (vgl. Abb. 1).

Jenem Teil der Theorie, welcher sich mit dem Bewegungsmechanismus des eigentlichen Trombenschlauches beschäftigt, haben wir nichts hinzuzufügen. Nach dem oben angedeuteten Gegenwartsstand unserer Kenntnisse wird man mit KOSCHMIEDER auch

¹ H. KOSCHMIEDER, Über Tromben, Wiss. Abh. RA f. Wetterd., VI/3 (1940).

² A. WEGENER, Wind- und Wasserhosen in Europa, Die Wissenschaft. 60 (1917).

¹ A. REFSDAL, Geof. Publ. V/12 (1930).

² V. BJERKNES, Met. Z. 17, 97 und 145 (1900); 19, 97 (1902).

grundsätzlich darüber einig sein können, daß die Trombenbildung durch einen thermodynamischen Prozeß eingeleitet wird, und zwar durch das Emporstudeln von Warmluftpaketen im *Cb*. Daß solche Warmluftpakete im *Cb* tatsächlich auftreten können, ist aerologisch durch Wetterflüge erwiesen¹. Um uns

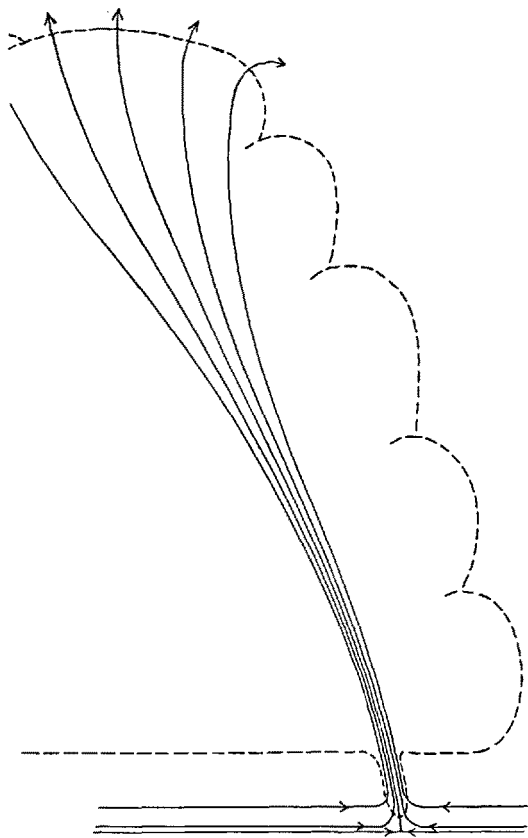


Abb. 1. KOSCHMIEDERS Schema der reinen Schlotströmung einer Trombe (d. h. bei fortgelassener Drehbewegung). — Stromlinien ausgezogen, Wolkgrenze (einschließlich des Trombenschlauches) gestrichelt.

ein Bild von der Energetik dieses Vorganges zu machen, wollen wir ihn zunächst als Tochterkonvektion innerhalb des Mutter-*Cb* ansehen.

Definitionsgemäß wird im aerologischen T -log p -Diagramm die feuchtlabile Energie, welche einem Luftteilchen bei bestimmter vertikaler Temperaturverteilung zur Verfügung steht, durch die Fläche gemessen, die von der Zustandskurve («Schichtungskurve») T_1 und der Zustandsänderungskurve des Luftteilchens («Hebungskurve») T_2 im Fall $T_2 > T_1$ eingeschlossen wird. Sie ist also — wie die Labilitätsenergie (algebraische Summe der trockenlabilen und der feuchtlabilen Energie) überhaupt — eine Funktion beider. Gleichwohl kann man gerade im eigentlichen Konvektionsfall zu einer absoluten Aussage über den Energiewert der vertikalen Temperaturverteilung kommen, da dann nur die Zustandsänderung eines einzigen Luft-

teilchens betrachtet zu werden braucht, nämlich jenes, welches aus Bodennähe aufsteigend die ganze Luftsäule durchsetzen würde. Diese Zustandsänderung, als adiabatisch angenommen, erfolgt bekanntlich bis zur Kondensationshöhe trockenadiabatisch und darüber feuchtadiabatisch; sie hängt also außer von der Temperatur auch von der Feuchtigkeit des Luftteilchens im Ausgangsstadium ab.

Wir nehmen nun an, daß die Zustandskurve T_1 im Bereich eines *Cb* bis zur Kondensationshöhe (Wolkenbasis) annähernd entlang der Trockenadiabate verlaufe, denn hier braucht die Luft nur im trockenindifferenten Gleichgewicht zu sein, um vom Aufstrom im *Cb* angesogen zu werden. Im Innern des *Cb* verlaufe T_1 zwischen der Trockenadiabate und der zur Kondensationshöhe gehörigen Feuchtadiabate T_2 . Die zur Erhaltung der normalen *Cb*-Konvektion nötige feuchtlabile Energie ist durch die zwischen der Zustandskurve und der eben genannten Feuchtadiabate eingeschlossene Diagrammfläche gegeben (vgl. die punktierte Zone in Abb. 2); die Fläche nimmt ab, da — ceteris paribus — T_1 infolge andauernden Freiwerdens von Kondensationswärme dem feuchtindifferenten Verlauf zustrebt¹. Eine Tochterkonvektion im *Cb* kann also nur zustande kommen, wenn in bezug auf die Luftteilchen, die in Bodennähe herangeführt werden und aufsteigen, *zusätzliche* feuchtlabile Energien entstehen. Dies ist offenbar auf drei verschiedene Arten möglich, wie die Abbildung 2 zeigt. Entweder können die höheren Schichten des *Cb* durch Kältezufuhr von fern her eine Abkühlung erfahren (Fall *a*); oder es kann — und dies ist nach KOSCHMIEDER der gewöhnliche Vorgang — die den *Cb* von unten her speisende Luft wärmer geworden sein (Fall *b*); oder es kann, was KOSCHMIEDER nicht erwähnt, diese Luft feuchter geworden sein (Fall *c*). Im Fall *a* erfolgt die Labilisierung von oben her; es liegt hier keine reine Konvektions-, sondern ein Übergang zu einer Advektions-situation vor. In den beiden anderen Fällen erfolgt die Labilisierung von unten her; auch hier handelt es

¹ Für dieses Jugendstadium des vollentwickelten *Cb* sind daher Beobachtungen über eine Erwärmung beim Einfliegen in die Wolke durchaus verständlich². Gegenteilige Feststellungen³ dahingehend, daß der *Cb* kälter sei als seine Umgebung, scheinen sich eher auf sein Altersstadium zu beziehen⁴; dann hat der aus den höchsten vereisten Wolkenteilen als Graupel einfallende Niederschlag bereits reichlich kalte Luft mit sich in den Hauptkörper der Wolke herabgerissen, während in der den *Cb* umgebenden und langsam absinkenden Atmosphäre schon seit langem dynamische Erwärmung im Gange ist. Damit erscheint es unnötig, anzunehmen, schon der jugendliche *Cb* sei — außer vielleicht in seinen höchsten, über ihre thermische Gleichgewichtslage hinaufgestossenen Teilen⁵ — kälter als die Umgebung und der Temperatureinfluß auf die Luftdichte müsse hier daher, damit die *Cb*-Luft überhaupt aufsteigen könne, kompensiert sein durch eine Mehrfachübersättigung⁶ oder eine Vergrößerung der Gaskonstante⁷ der Wolkenluft.

² W. WENZEL, Met. Z. 50, 65 (1933).

³ W. GEORGI, Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 16, 199 (1930).

⁴ J. LETZMANN, Met. Z. 47, 236 (1930).

⁵ H. v. FICKER, Sitz.-Ber. Berl. Akad. d. Wiss. 3, 28 (1931).

⁶ W. KOPP, Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 16, 173 (1930).

⁷ H. JOHANSEN jr., Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 18, 165 (1932).

¹ W. SCHWERDTFEGER und R. SCHÜTZE, Z. f. angew. Met. 55, 137 (1938).

sich streng genommen um die Mitwirkung einer Advektion, die aber rein lokalen Charakter hat im Rahmen der Konvektionszirkulation des *Cb*. Wir möchten dem Fall *c*, in dem sich an den Temperaturen überhaupt nichts ändert, unter Umständen eine größere Bedeutung beimessen als dem Fall *b*. Denn in der Regel wird die Tageserwärmung unter einem ausgedehnten *Cb* nicht erheblich sein, während das besonders häufige Auftreten von Tromben in der Nähe von

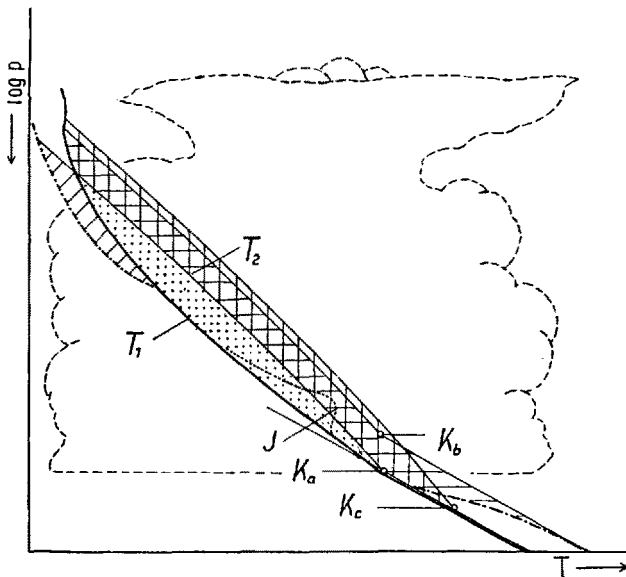


Abb. 2. Bildung zusätzlicher feuchtlabiler Energie im *Cumulonimbus*. — Fall *a* (schräg schraffiert): bei Kaltluftzufuhr in der Höhe. Fall *b* (waagrecht schraffiert): bei Zufluß wärmerer Luft unten. Fall *c* (senkrecht schraffiert): bei Zufluß feuchterer Luft unten. — K_a, K_b, K_c Kondensationshöhen in den Fällen *a, b* und *c*. — T_1 ursprüngliche Schichtungskurve; T_2 ursprüngliche Hebungskurve; punktierte Fläche: ursprüngliche feuchtlabile Energie. J unwahrscheinliche Inversion.

Seen und Küsten sowie über dem Meer schon an und für sich darauf hindeutet, daß der Feuchtigkeitszufluß eine besondere Rolle spielen dürfte bei der Herstellung jener thermodynamischen Bedingungen, welche zur Trombenbildung führen. Dafür könnte auch die oft beobachtete Ausstülpung der Wolkenbasis nach unten vor Eintritt der Trombenbildung sprechen. Aus der Abbildung 2 geht ja hervor, daß im Fall *a* die Wolkenbasis unverändert bleibt, im Fall *b* sich im Zuflußbereich wärmerer Luft hebt und im Fall *c* sich im Zuflußbereich feuchterer Luft senkt. Im übrigen ist es durchaus denkbar, daß die Fälle *b* und *c* miteinander kombiniert auftreten können oder alternierend, wenn der *Cb* langsam über eine Landschaft mit wechselnder Oberflächenbeschaffenheit hinwegzieht.

Um die *Plötzlichkeit* der Bildung von Warmluftpaketen zu erklären, hat KOSCHMIEDER, soweit ersichtlich, angenommen, daß auch die zusätzlichen feuchtlabilen Energien plötzlich entstehen in dem Augenblick, wo eine Temperaturinversion innerhalb des *Cb* ihren Sperrschichtcharakter verliert. Es wäre dies jener Augenblick, wo die vom Boden aufsteigen-

den Luftteilchen so warm (oder so feucht) geworden sind, daß an der Inversionsstelle $T_2 > T_1$ wird. Dies setzt voraus, daß vorher im *Cb* $T_2 < T_1$ war, d. h. daß das spontane Aufsteigen der Luft eben durch die Inversion gesperrt gewesen sei (vgl. J in Abb. 2). Dies und damit überhaupt die Annahme einer Inversion im *Cb* ist aber unvereinbar mit der üblichen Vorstellung, die man sich vom Mechanismus der *Cb*-Wolke als sinnfälligsten Ausdrucks einer durchgehenden Konvektionsströmung macht. Der von KOSCHMIEDER herangezogene aerologische Nachweis von Inversionen im Vorstadium der Bildung des *Cb* sagt nichts aus über die spätere Temperaturverteilung in dieser Wolke, die offenbar inversionsfrei ist, abgesehen vielleicht von deren höchsten Teilen. Würde es sich aber um den Durchbruch durch eine Inversion oberhalb des Hauptkörpers der Gewitterwolke handeln, in einen darüberliegenden feuchtlabilen Bereich hinein, so läge die Auslösungsstelle des Trombenvorganges gegebenenfalls unwahrscheinlich hoch (> 4 km) und jedenfalls höher, als es das KOSCHMIEDERSCHE «Schlotschema» (Abb. 1) annehmen läßt. Auch müßte dann das Herausschießen des Warmluftpakets aus dem *Cb* deutlich von der Seite aus sichtbar werden, etwa als ungewöhnlich heftige und hochreichende Eruption eines schmalen Wolkensturms. Beobachtungen über die unmittelbare zeitliche Aufeinanderfolge einer *Cb*-Protuberanz und einer Trombe liegen aber unseres Wissens bisher nicht vor.

Wir sind somit vorläufig nicht in der Lage, über die Umstände eine Aussage zu machen, welche die Plötzlichkeit der Bildung von Warmluftpaketen im *Cb* verursachen. Will man nicht Zuflucht nehmen zu vagen Hypothesen (z. B. zu der eines Kondensationsverzuges mit Mehrfachübersättigung¹ bei verstärkter Feuchtezufuhr), so bleibt vorläufig nichts anderes übrig, als sich mit jener scheinbaren Zufälligkeit — oder richtiger: praktischen Unkontrollierbarkeit — abzufinden, die der Auslösung auch anderer kleinräumiger atmosphärischer Vorgänge eigen ist in örtlicher und zeitlicher Hinsicht, wofür nur die *allgemeinen* Vorbedingungen für das Zustandekommen dieser Vorgänge gegeben sind.

Die allgemeinen Vorbedingungen der Trombenbildung wurden bisher unter der Voraussetzung behandelt, daß die Mutterwolke ein typischer *Cb* sei. Dabei hat es sich gezeigt, daß uns die thermische Struktur des *Cb* eher aus indirekten Schlüssen als aus tatsächlichen Messungen bekannt ist. Eine vollständige thermodynamische Trombentheorie erfordert daher eine genauere aerologische Erforschung dieser Wolke als bisher, und zwar unter Beachtung der reichen Gliederung ihres Aufbaus, als Ausdruck des relativ ungeordneten Charakters der Konvektion. Sie wird ferner auch jene Fälle zu berücksichtigen haben, in denen der Trombenschlauch statt aus einem eigent-

¹ W. KOPP, Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 16, 173 (1930).

lichen *Cb* aus einer weniger entwickelten Konvektionswolke herauswächst, etwa aus einem *Cumulus congestus* oder gar nur aus einem *Cumulus* geringfügiger Ausmaße^{1,2}. In diesem Zusammenhang ist es sehr erwünscht, daß Beobachter von Tromben sich durch den fesselnden Anblick des eigentlichen Wirbelschlauches nicht ablenken lassen von der Wahrnehmung der Begleitumstände und namentlich der Detailstruktur der Mutterwolke³. Beginnt die Beobachtung erst, wenn der Wirbelschlauch bereits gebildet ist, so bleiben natürlich die Vorstadien der Mutterwolke unbeachtet. Daher sollte der Wolkenentwicklung schon bei bloß trombenverdächtigen Wetterlagen ein erhöhtes Augen-

¹ W. KURRIK, Z. f. angew. Met. 42, 19 (1925).

² H. MARKGRAF, Ann. Hydr. u. mar. Met. 57, 14 (1929).

³ Die Internationale Klimatologische Kommission hat den meteorologischen Landesdiensten und Beobachtern eingehende «Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben»⁴ empfohlen, welche auch das Studium der Mutterwolke mitberücksichtigen.

⁴ J. LETZMANN, Publ. Sekr. Int. Met. Org. Nr. 38, 91–110 (1939).

merk zugewendet werden; für solche Wetterlagen haben Beobachter in Gegenden mit großer Trombenhäufigkeit oft einen erstaunlich guten Blick.

Summary

KOSCHMIEDER's new thermodynamical theory of tornado formation (1940) makes it probable that a tornado (or a waterspout) develops when a warm air packet rises quickly within the convective mother cloud. In the present paper the three principle cases of conditions are indicated under which supplementary amounts of potential energy necessary to start a "daughter convection" in the cumulo-nimbus cloud can become available in the latter. Supply of moister air from below seems to be at least as important as that one of warmer air. However, the suddenness of the release of the said supplementary energy cannot be explained by the abrupt annihilation of an intercepting layer within the main body of the cumulo-nimbus, for the pre-existence of such a layer is incompatible with the general character of this type of cloud.

Les tests microbiologiques pour la détermination des vitamines

Par W. H. SCHOPFER, Berne

Introduction

Dès la découverte des facteurs accessoires de croissance, que FUNK appela très heureusement «vitamines», s'est avéré la nécessité de mesurer quantitativement leur action. Cette obligation était d'autant plus impérieuse que très tôt on reconnut qu'entre les vitamines et les aliments ordinaires se manifestait une différence fondamentale de nature quantitative et qualitative: ces facteurs accessoires n'agissent pas d'une manière plastique ou énergétique au sens ordinaire de ces expressions. Les doses nécessaires à leur action sont très faibles, comparées à celles qui sont requises pour les glucides, les lipides, les protides ou les sels minéraux. Tout au plus peut-on comparer leur effet avec celui des éléments minéraux à action catalytique (Spurenelemente).

Ainsi, au cours des années et dès 1900, furent mis au point les tests animaux. Le principe théorique d'une mesure d'activité est le suivant: l'animal reçoit un régime constitué par des quantités optimales de glucides, de lipides, de protides, de sels minéraux ainsi que de tous les autres facteurs vitaminiques nécessaires à la croissance normale, sauf la vitamine dont on veut étudier l'action. Il se manifeste une avitaminose s'exprimant par des symptômes variés, en particulier par un ralentissement ou un arrêt de la croissance que l'on peut observer avec de nombreuses vitamines. L'adjonction au régime déficient de la vitamine étudiée, conduira, dans des conditions définies,

à un rétablissement de la croissance et à une guérison de l'avitaminose (béribéri, scorbut, pellagre, etc.).

Tous les traités de vitaminologie exposent en détail les prescriptions à suivre lors de l'utilisation de ces tests. Du point de vue général qui nous intéresse ici, deux faits essentiels sont à retenir: chaque vitamine exerce, dans des conditions données, une *action spécifique*; d'autre part, l'action de la vitamine est *quantitative*. La notion de spécificité doit être envisagée avec prudence. On sait que, chez les microorganismes en particulier, des phénomènes de remplacement d'un facteur par un autre peuvent se manifester.

Pendant plusieurs décennies, les tests animaux furent les seuls à être utilisés. Ils ont permis la mise en évidence, qualitative tout d'abord, puis quantitative, des principales vitamines dans les aliments et dans les produits naturels. Aux mains d'un spécialiste exercé, les tests animaux permettent aujourd'hui la détermination de très faibles quantités de vitamines.

Le recours au test animal est, actuellement encore, indispensable, car, du point de vue pratique, la détermination d'une vitamine se fait du point de vue de l'alimentation *humaine et animale*. Même si les données fournies par d'autres tests paraissent dignes de confiance, il est nécessaire d'effectuer un contrôle et une comparaison avec le test animal.

Nous ne donnons ici aucun détail sur ces tests et sur leurs différentes formes. On les trouve exposés dans tous les traités de vitaminologie.