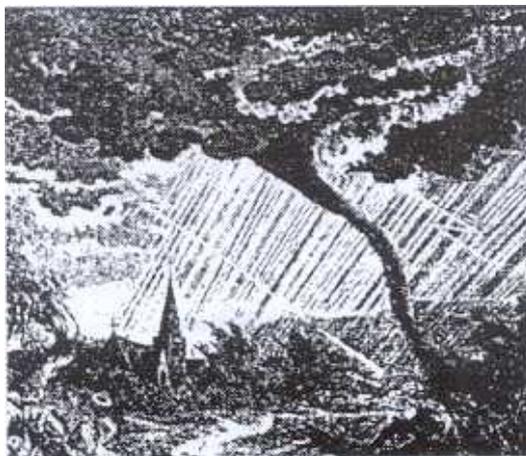


La trombe

173



Collection de l'Atelier d'exploration

Conseiller scientifique

J. Dessens

Centre de recherches atmosphériques

Laboratoire d'aérodynamique, UMR CNRS/UPS 5560

65300 Campistrous

Réalisation

P. Bastide

1. Contenu scientifique

Description physique des trombes

Classification et fréquence des trombes selon leur violence

Le sinistre

La simulation en laboratoire

2. Description de la manipulation

Introduction

Les tourbillons prennent dans l'atmosphère différentes dimensions : de la perturbation dépressionnaire de plusieurs milliers de kilomètres de diamètre au plus petit tourbillon de poussière qui se forme dans l'encoignure d'un bâtiment. Deux types de tourbillons sont particulièrement redoutables : le cyclone tropical qui se forme vers la fin de l'été au-dessus des mers chaudes et la trombe (on dit parfois tornade) qui apparaît au hasard des circonstances météorologiques mal élucidées lors des orages dans certaines régions du globe. Ces deux tourbillons ne sont pas complètement étrangers l'un à l'autre : les orages des cyclones tropicaux engendrent bien souvent des trombes. Mais ils diffèrent cependant énormément par leur rapport de géométrie, c'est-à-dire le rapport de leur diamètre à leur longueur axiale.

Le but de la manipulation « La trombe » est de faire comprendre le phénomène de la trombe à partir d'une simulation. Cette manipulation s'inscrit dans l'histoire des manips d'exposition. Au palais de la Découverte, il existe une version de simulation de la trombe qui utilise la condensation de la vapeur d'eau pour la visualisation du vortex. Pour des raisons évidentes de sécurité, l'ensemble est placé derrière une protection transparente de forme cylindrique qui nuit beaucoup à la visibilité à cause des très nombreux reflets. L'Exploratorium de San Francisco a résolu le problème en remplaçant la source chaude par une source froide constituée par humidificateur à ultrasons du commerce. Avec une visualisation par des micro-gouttelettes, le visiteur peut agir directement sur le vortex, le déformer, le dévier, l'arrêter.

L'effet étonnant, spectaculaire, est assuré ainsi que la compréhension par l'expérimentation, l'exploration des propriétés du vortex. En étudiant les documents publiés par l'Exploratorium, nous avons cerné un certain nombre de difficultés de compréhension de cette simulation, notamment en ce qui concerne le principe de production du tourbillon et, *a fortiori*, son analogie avec le phénomène naturel.

Notre but, au-delà de la réalisation d'un prototype dont l'originalité réside dans le rotor de production du vortex (dispositif de J. Dessens), a été de rechercher des solutions d'amélioration de son efficacité. Par manque de temps, nous n'avons pas pu expérimenter les informations qu'il faut ajouter au dispositif de simulation pour que le public comprenne le phénomène « tornade ». Cette manip intéresse fortement le public, elle est spectaculaire et surprenante. Mais comme elle ne permet pas de comprendre immédiatement le principe du phénomène, les visiteurs restent sur leur faim.

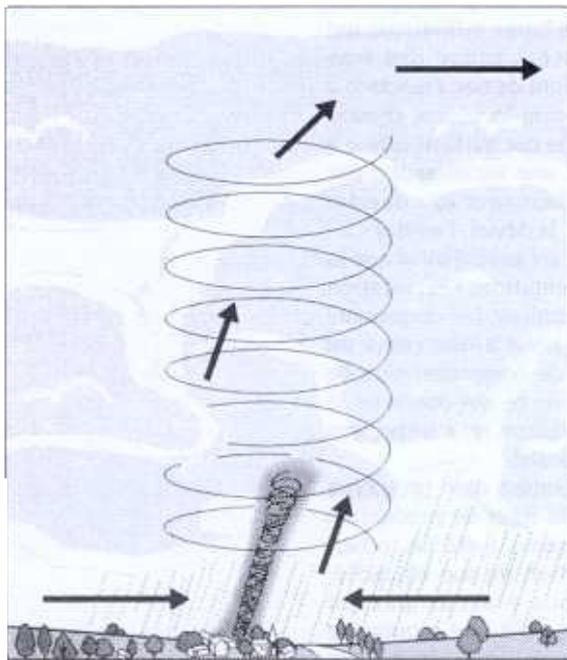
1. Contenu scientifique

Description physique des trombes

Quand on vide un lavabo ou une baignoire, l'eau se met parfois à tourbillonner violemment (**fig. 2**) avant de s'engouffrer avec un grand bruit dans le trou de vidange.

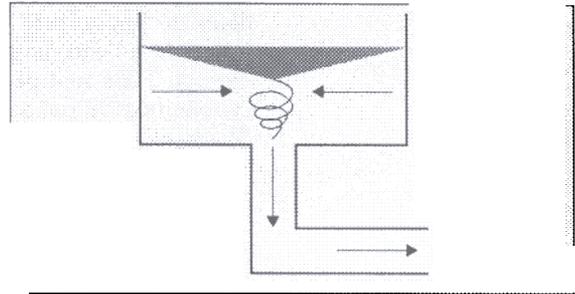
Il se passe parfois quelque chose de comparable dans l'atmosphère : les cumulo-nimbus, c'est-à-dire les orages, pompent l'air chaud et humide des basses couches de l'atmosphère. Ce pompage est particulièrement violent si un jet-stream, c'est-à-dire un fort courant horizontal vers le haut de l'orage, évacue latéralement l'air pompé. le courant ascendant au-dessous de l'orage s'organise exceptionnellement en tourbillon qui prend naissance dès le sol. L'air se met à tourner avec un grand bruit en entraînant tout ce qu'il peut arracher au sol : c'est la trombe (**fig. 1, 5**).

Figure 1



Le schéma ci-dessus est regardé de bas en haut : l'orage aspire l'air instable des basses couches de l'atmosphère. Comme cet air possède une rotation diffuse provoquée par la rotation terrestre, une trombe peut s'amorcer.

Figure 2

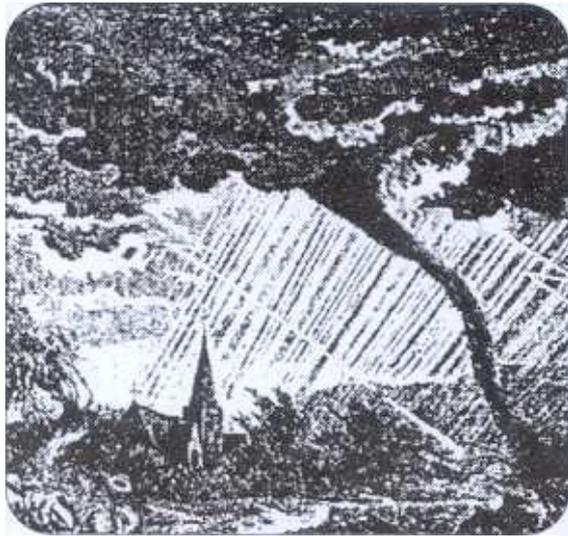


Si on donne à l'eau de ce récipient un léger mouvement de rotation, elle s'écoule en tourbillon par suite de concentration du mouvement de rotation.

Définition d'une trombe

Selon la définition de l'Organisation météorologique mondiale, une trombe consiste en un tourbillon de vent souvent intense. Sa présence se manifeste par une colonne nuageuse ou un cône nuageux renversé en forme d'entonnoir, sortant de la base d'un cumulo-nimbus, par un buisson de gouttelettes d'eau soulevées de la surface de la mer, ou par des poussières, du sable ou des débris divers soulevés du sol. Les anglo-saxons désignent ce phénomène sous le nom de *tornado*, d'où l'emploi fréquent en français de tornade à la place de trombe. En toute rigueur, le terme de tornade désigne, en météorologie, un orage de l'Afrique occidentale. On peut observer des trombes sur mer aussi bien que sur terre. Il peut même arriver qu'une trombe marine accoste le rivage et se transforme en trombe terrestre (**fig. 3, 4**). Selon Lewellen, le volume de l'atmosphère concerné par la trombe est divisé en quatre régions interdépendantes (**fig. 6**). La région I est le noyau de l'écoulement. Elle s'étend de l'axe de la trombe jusqu'à un rayon de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres dans les plus grosses trombes. Le sommet et la base de cette région ne sont pas nettement définis. La ceinture extérieure de la région I est une zone de convergence où l'air conserve approximativement son moment angulaire. L'air tourne donc plus vite à mesure qu'il se rapproche de l'axe, mais cette accélération est limitée par la valeur de l'énergie potentielle disponible et par les forces de viscosité et de turbulence. Par suite de l'importance de la diffusion, la région interne du noyau est approximativement en rotation solide. Il n'y a donc

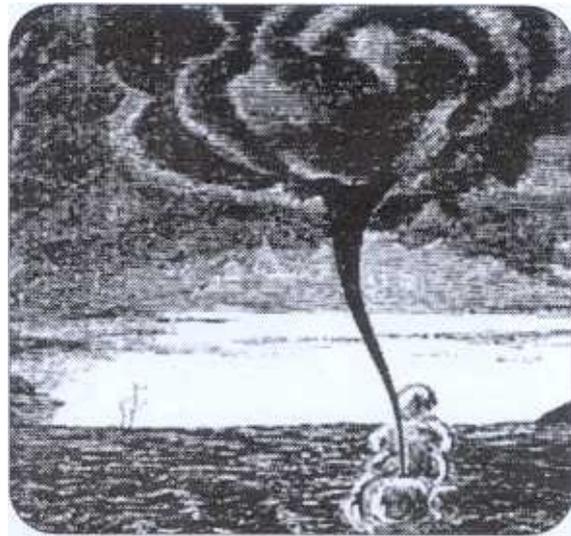
Figure 3



Trombe terrestre.

Source : Flammarion C., *L'Atmosphère*, Hachette, Paris, 1872.

Figure 4



Trombe de mer.

Source : Daguin P. A., *Traité élémentaire de physique*, Delagrave, Paris, 1867.

pratiquement pas d'entraînement dans le noyau. L'écoulement le long de l'axe peut aussi bien être ascendant que descendant et il peut exister des points de stagnation au-dessus du sol. La partie inférieure de la région I se raccorde à la région II de la couche limite où il y a une forte interaction de l'écoulement avec la surface. La région II s'étend du sol jusqu'à quelques centaines de mètres d'altitude. Dans cette région, les vitesses tangentielles sont freinées. Il n'y a plus d'équilibre entre les forces centrifuges et celles de pression, d'où une forte convergence de l'air vers l'axe. La région III est celle où le courant de convergence se transforme en courant ascendant et où les gradients horizontaux et verticaux sont importants dans les équations du mouvement. La région IV borne la trombe à sa partie supérieure. La trombe mesurée par radar Doppler se développe parfois jusqu'à plus de 10 km d'altitude, mais son noyau s'évase, de sorte que les vitesses tangentielles diminuent avec l'altitude.

Classification et fréquence des trombes selon leur violence

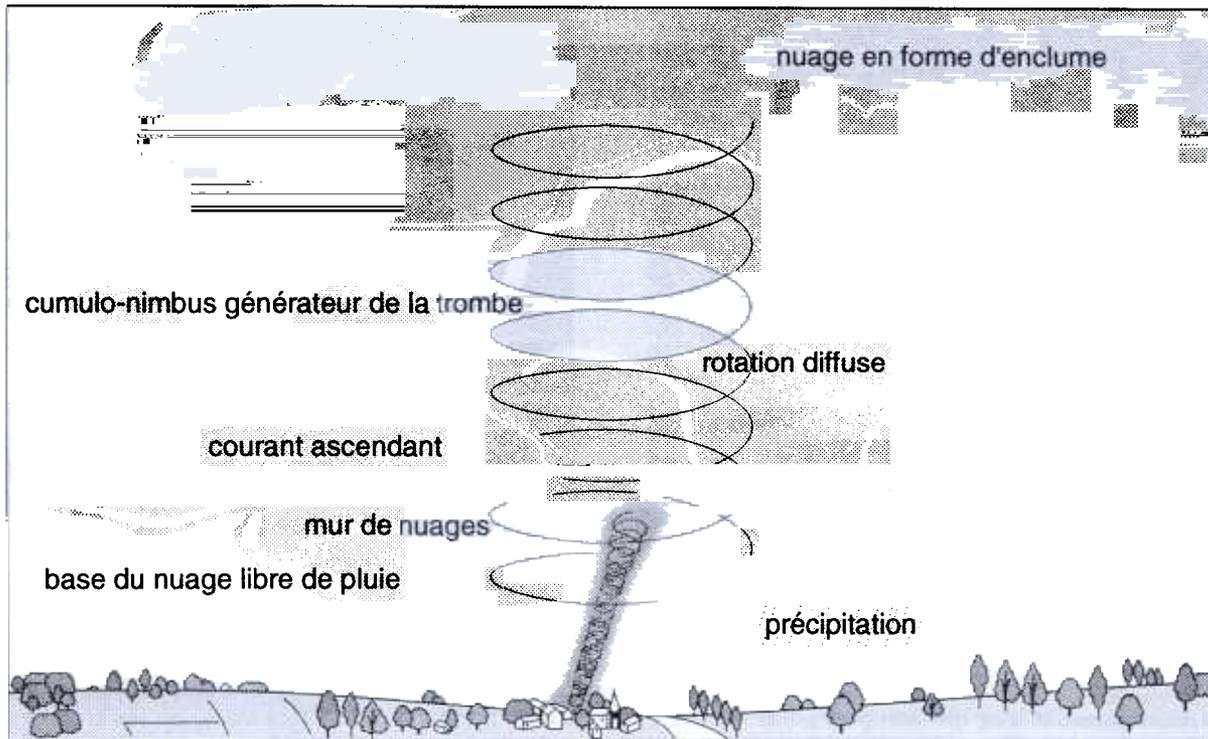
On peut rencontrer des trombes de quelques dizaines de mètres jusqu'à deux ou trois kilomètres de diamètre. En moyenne, l'intensité de la trombe est en rapport avec ses dimensions. Comme pour les séismes, on a établi des échelles d'intensité, la plus employée étant celle de Fujita. Cette échelle va de F0 pour de petites trombes ne provoquant que des dommages mineurs à F5 pour des cataclysmes

pouvant dévaster des villages entiers ou de grandes forêts (**tabl. 1**). Aux États-Unis, où les trombes provoquent en moyenne chaque année la mort de 125 personnes et des dommages estimés à 75 millions de dollars, Grazulis¹ a répertorié plus de douze mille trombes violentes (F2 et au-dessus) de 1880 à 1989. Pour une période à peu près comparable, Dessens et Snow² n'ont recensé qu'une centaine de trombes violentes en France. Le rapprochement de ces chiffres donne une idée à peu près exacte de la fréquence relative du phénomène dans les deux pays, si on applique un terme correctif pour les superficies. La probabilité de trombes d'intensités F0 à F2 dans un département de la France est de l'ordre de une par an. Mais ces trombes n'entraînent, en général, que la destruction de quelques hangars, toitures ou parcelles de forêts. Il arrive cependant que des personnes soient atteintes par des chutes d'arbres ou de tuiles. La probabilité de trombes d'intensités F3 à F5 dans l'ensemble de la France est à peine supérieure à une par an. Chacune de ces trombes est un cataclysme localisé dont les conséquences très graves peuvent conduire au déclenchement du plan Orsec. Depuis 1960, vingt personnes ont été tuées et plus de trois cents ont été blessées par des trombes. Si l'éparpillement des points touchés sur la carte de France suggère qu'aucune région n'est complètement à l'abri du risque, on observe cependant que les

1. Grazulis T. P., *Significant tornadoes 1880-1989*, vol. II. *A chronology of events*. Environmental films. St-Johnsbury, Vermont (U.S.A.), 1990, p. 685.

2. Dessens J. & Snow J. T., « Tornadoes in France », *Weather and forecasting*, avril 1989, pp. 110-132.

Figure 5



Anatomie d'une trombe.

Source : d'après J.T. Snow.

trombes d'intensités F4 et F5 sont localisées à quelques zones du territoire, dont la plus importante s'étend en longueur du Poitou-Charente au Nord-Pas-de-Calais (fig. 7). Les trombes sont surtout observées dans les zones côtières pendant la saison froide de novembre à mars et, dans l'intérieur du pays, pendant la saison chaude d'avril à octobre. Les trombes « d'hiver » s'observent typiquement lorsque le vent au sol est fort. Des irrégularités topographiques peuvent alors donner naissance à des tourbillons d'obstacle. Le couplage de ce type de situation avec une tendance orageuse même faible suffit au déclenchement des trombes. Ces trombes « d'hiver » peuvent aussi bien tourner dans le sens cyclonique que dans le sens anticyclonique. Quant aux trombes « d'été », elles sont associées à la convection violente qui se concentre dans les zones de convergence des perturbations cycloniques : ces trombes tournent pratiquement toutes dans le sens cyclonique.

Le sinistre

En France, les trombes se déplacent en général dans une direction du sud-ouest vers le nord-est à la vitesse de leur cumulo-nimbus père, soit en moyenne 40 km/h. Leur trajectoire est le plus souvent rectiligne et d'une longueur moyenne de 9 km. Sa largeur est en moyenne de 300 m. Grâce au processus de

déclenchement par des vents forts, il peut y avoir des trombes en toutes saisons. Cependant, la période principale va de mai à septembre avec un maximum en août. Le maximum de fréquence horaire se situe entre seize heures et dix-sept heures UTC.

L'aspect de la trombe est celui d'un nuage pendant, s'échappant de la base du cumulo-nimbus et atteignant généralement le sol. Ce nuage, appelé en français un « tuba » se forme en dessous du niveau normal de condensation. Il est provoqué par la détente de l'air qui converge, tout en spiralant vers le haut, dans la zone dépressionnaire que constitue la trombe. Ce phénomène de condensation visualise la tornade et joue surtout un rôle énergétique dont l'importance n'est pas encore bien connue. Quand le pied de la trombe atteint le sol (et même s'il n'y a pas condensation jusqu'au sol), les dégâts apparaissent. On peut, dans une certaine mesure, les différencier suivant qu'ils sont dus à l'un ou l'autre des deux processus suivants.

Mise en surpression relative brutale de toute cavité bien fermée contenant de l'air (fig. 8)

Si la pression extérieure diminue au passage de la trombe d'un dixième d'atmosphère, la force de pression qui agit sur les parois de la cavité est d'un dixième de kilogramme par centimètre carré. D'où des sols carrelés entièrement déparés (Valros, Hérault,

Tableau 1

Force	Dommages	Vitesse du vent (Km/h)	Spécifications
F0	Légers	61 à 115	Antennes de TV tordues, petites branches d'arbres cassées, caravanes déplacées.
F1	Modérés	116 à 175	Caravanes renversées arbres arrach dépendances soufflées.
F2	Importants	175 à 250	Toitures soulevées, objets légers transformés en projectiles, structures légères brisées.
F3	Sévères	250 à 330	Murs de maisons renversés, arbres cassés dans les forêts, projectiles de grandes dimensions.
	Dévastateurs	30 à 410	Maisons bien construites rasées, gros projectiles, quelques arbres emportés par le vent.
F4	Incroyables	410 à 510	Fortes structures envolées, arbres emportés par le vent, projectiles à grande vitesse.

Échelle de Fujita, vitesse du vent et spécification des dommages.

T., *Workbook of tornadoes and high winds*, SMRP Research paper 165, the University of Chicago, 1978, p. 142.

6

7

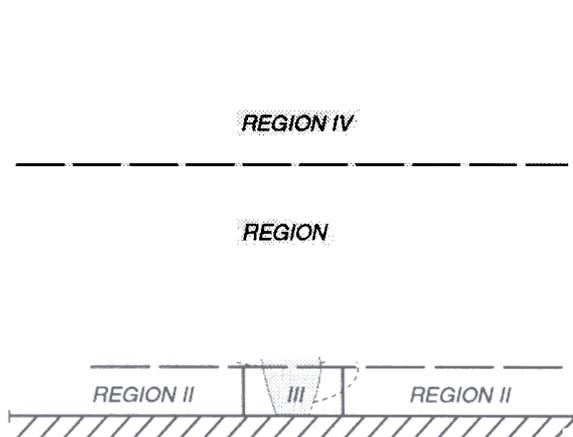
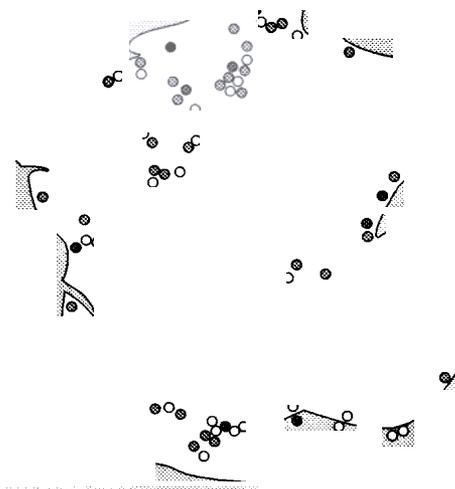


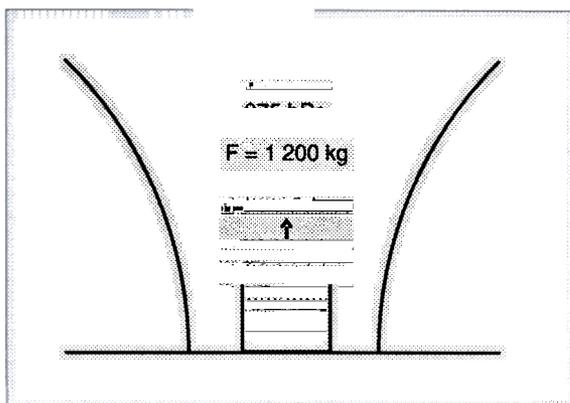
Schéma d'une trombe.

Source : d'après Lewellen W. S., *Theoretical models of the tornado vortex. Symposium on tornadoes*, Texas Tech. Univ., 1976, pp. 107-143.



Localisation de toutes les trombes violentes recensées en France depuis 1860.

Figure 8



Mise en surpression relative, au passage d'une trombe, d'une cavité fermée remplie d'air.

Dans la cavité, la pression est restée ce qu'elle était quelques secondes auparavant, 1 000 mb par exemple. Autour de la cavité, la pression est devenue celle régnant dans la région axiale de la tornade : 975 mb par exemple. Ce sont les 25 mb de différence qui, sur une surface de 5 m², équivalent à une force de 1 200 kg.

180

25 septembre 1965), des pupitres fermés à clé qui s'ouvrent, des tombes de cimetières bouleversées (Garac, Haute-Garonne, 18 mai 1960, Riencourt, Pas-de-Calais, 24 juin 1967), des toitures arrachées (Noirétable, Loire, 14 août 1954 : un dôme en ciment de 5 m² pesant 1 200 kg est emporté par une dépression de 25 mb), des bâtiments entiers qui éclatent.

Le vent atteint plusieurs centaines de kilomètres à l'heure

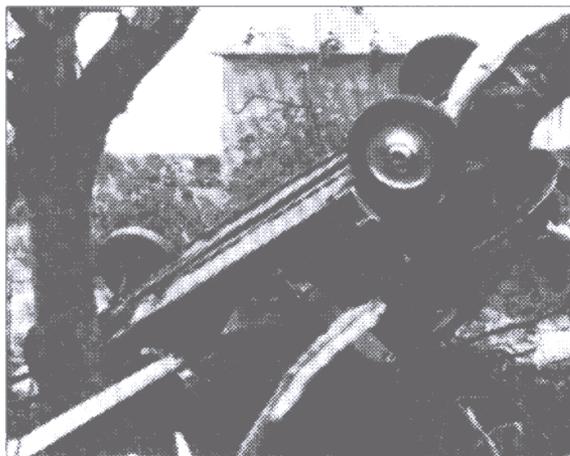
Les arbres sont déracinés ou sectionnés, les objets emportés par le vent se transforment en redoutables projectiles : « Les poutres traversaient le ciel avec une grande vitesse et la légèreté d'une plume », rapporte le maire d'Honnechy, Nord (14 janvier 1965). Des branches arrachées sont retrouvées plantées dans des charpentes et même dans de l'acier. Des poulets sont retrouvés complètement déplumés, mais vivants. Les objets arrachés par la trombe qui ont un bon rapport surface-poids s'élèvent très haut et les témoins croient alors reconnaître « des vols de corbeaux éparpillés » (Puygaillard-de-Quercy, Tarn-et-Garonne, 30 octobre 1952). En effet, un corps peut spiraler longtemps dans la trombe, car la vitesse d'ascendance suffit à le maintenir à un certain niveau au-dessus du sol, ou même à le faire monter et la force d'entraînement radiale (due à la convergence de l'air) compense la force axifuge due à la rotation. Comme la convergence diminue très vite avec la hauteur, près du sol, les corps les plus lourds sont axifugés dès qu'ils sont à quelques dizaines de mètres

au-dessus du sol. C'est pourquoi le pied de la trombe - s'il est vu d'assez près - apparaît comme une masse mal définie de débris soulevés du sol. Une autre conséquence des vitesses atteintes par le vent est le bruit impressionnant qui accompagne la trombe. Au fil des progrès des moyens de communication, les témoins l'ont successivement comparé au bruit que feraient des chariots roulant sur un sol caillouteux, des trains express franchissant des viaducs et, enfin, des avions à réaction volant très bas. De nos jours, quand une trombe s'abat sur une maison, les habitants croient qu'un avion à réaction s'écrase sur eux. Ce bruit doit être provoqué essentiellement par la friction de l'air tout le long de la trombe et, accessoirement, par les destructions occasionnées au sol. Des phénomènes électriques particuliers sont associés aux éclairs intenses, foudre en boule, décharge lumineuse continue. Ces phénomènes augmentent certainement les dégâts (électrocutions, incendies). Ils ajoutent surtout du fantastique aux récits des témoins. Ils procurent de sérieuses difficultés aux physiciens qui cherchent à les expliquer.

La simulation en laboratoire

Dès la fin du siècle dernier, des physiciens ou météorologistes se sont aperçus qu'il était assez facile de reproduire de différentes façons en laboratoire des phénomènes d'apparence très similaires aux tourbillons de l'atmosphère, particulièrement aux trombes et autres tourbillons de petit diamètre. La méthode est toujours la même : il s'agit de produire un courant d'air ascendant au sein d'une masse d'air en rotation lente. L'appel d'air à la partie inférieure du courant ascendant provoque une accélération de la vitesse de rotation. Cette vitesse pourrait théoriquement devenir infinie sur l'axe de rotation si les forces de frottement n'existaient pas. En fait, on observe qu'en deçà d'un certain diamètre, les vitesses cessent d'augmenter pour diminuer progressivement et devenir nulles sur l'axe. Il existe de nombreuses variantes à cette expérience de simulation. On peut produire le courant ascendant en chauffant l'air au voisinage du sol, tout en assurant une dissymétrie au courant de convergence qui va nourrir l'ascendance. On simule alors remarquablement bien les tourbillons qui se produisent au voisinage des incendies. On peut également produire le courant ascendant à l'aide d'un aspirateur et entourer ce courant ascendant d'un tamis tournant ou simplement d'un cylindre au bas duquel on a aménagé des ouïes d'arrivées tangentielles de l'air. On peut enfin - et c'est la méthode la plus simple - disposer au-dessus du sol un tourniquet à l'axe vertical (fig. 10, 13) qui va à lui seul assurer une aspiration axiale et un renvoi d'air en rotation diffuse. Dans ce dernier cas, il suffit de prévoir autour de

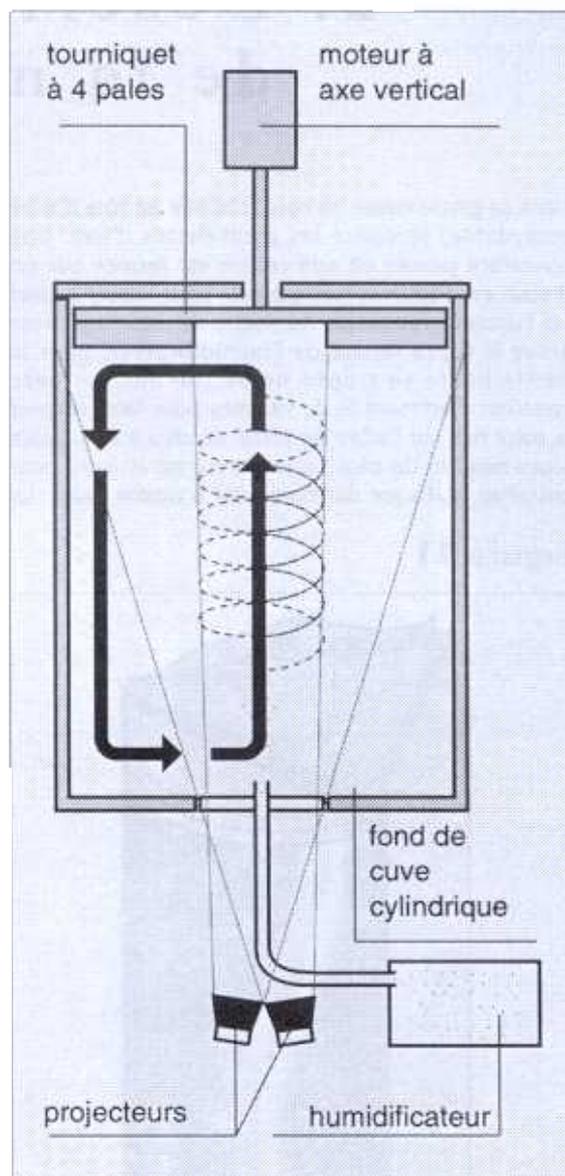
Figure 9



Après la trombe.

l'expérience un cylindre pare-vent qui empêchera les courants d'air parasites de perturber le tourbillon. De larges fenêtres peuvent être aménagées dans ce cylindre. Un volet important de l'expérience pour qu'elle soit démonstrative concerne la visualisation du tourbillon. Si on veut simuler un tourbillon d'incendie, le mieux est d'utiliser un système fumigène. Pour simuler une trombe, il vaudra mieux introduire dans l'écoulement des gouttelettes d'eau analogues aux gouttelettes de condensation se formant par détente de l'air dans la zone axiale dépressionnaire de la trombe. Les gouttelettes peuvent être produites par condensation de vapeur d'eau chaude ou par pulvérisation fine d'eau. Des variations dans l'intensité du courant ascendant permettront de reproduire les différents stades d'évolution des trombes : formation, atténuation ou renforcement, dissipation. Un système de rugosité variable du sol permettrait en outre d'observer le rôle primordial joué par la couche de surface sur l'ensemble de l'écoulement. De l'eau chaude ajoutée au bas de la cuve provoque une très belle visualisation de la tornade miniature. Outre son aspect assez spectaculaire et son rôle dans l'explication qualitative des phénomènes tourbillonnaires (jumelage d'un courant d'air vertical à une rotation diffuse autour de l'axe du courant), l'expérience a servi et sert toujours à améliorer la connaissance physique des trombes. En effet, le caractère sporadique du phénomène naturel ainsi que sa violence (les vents atteignent trois cents kilomètres à l'heure au sol dans les trombes de classe moyenne) empêche de réaliser les séries de mesure qu'exigerait un planning expérimental convenable. Les physiciens se rabattent sur les mesures en laboratoire pour caler les modélisations numériques. À titre démonstratif, les mesures les plus ordinaires que l'on peut réaliser dans un modèle de laboratoire sont celles de la pression. Un simple tube de Pitot

Figure 10



Production d'un tourbillon en cuve.

relié à un manomètre à eau permet déjà de mesurer le champ de pression et de calculer assez correctement la vitesse tangentielle de l'air à l'aide de l'équation cyclostrophique projetée sur le plan horizontal : $dp/dr = r \cdot v^2/r$. Church et Snow³ ont donné une description détaillée des travaux scientifiques les plus récents qui ont été réalisés sur des modèles de laboratoire de la trombe.

3. Church C. R. & Snow J. T., *Laboratory models of tornadoes*. Geophysical monograph 79, American Meteorological Society, 1993, pp. 277-295.

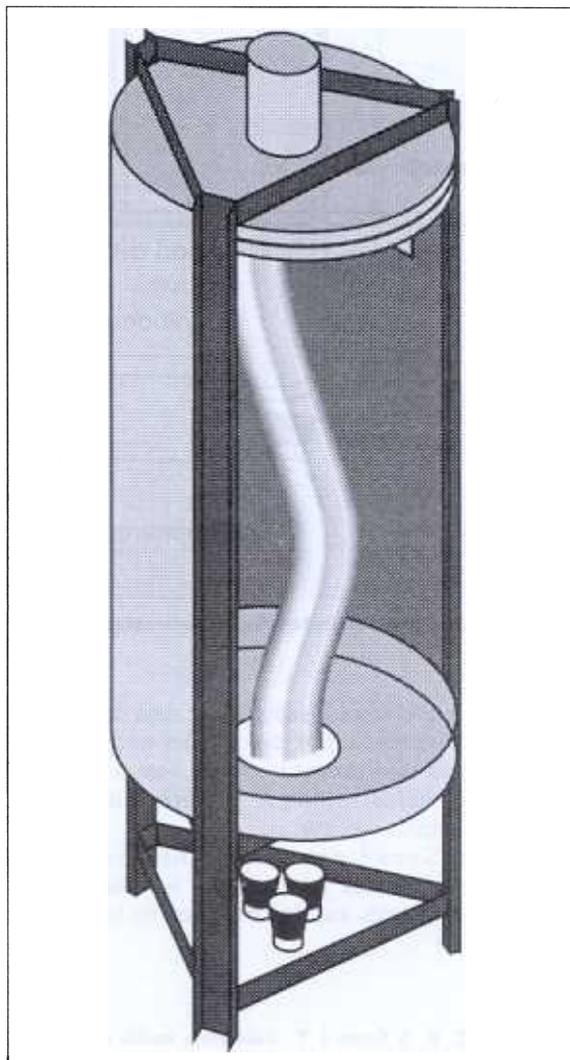
2. Description de la manipulation

Dans sa partie basse, la cuve (réalisée en tôle d'acier inoxydable) récupère les gouttelettes d'eau. Une ouverture percée en son centre est fermée par un disque en plastique transparent pour laisser passer les faisceaux lumineux. Au centre de cette ouverture arrive le tuyau venant de l'humidificateur. Dans la partie haute se trouve un motoréducteur avec variateur électronique de vitesses pour faire tourner le rotor fixé sur l'arbre de sortie de zéro à trois cents tours-minute. Un plus petit moteur aurait suffi pour entraîner le disque du tourniquet à quatre pales. La

vitesse est commandée à partir d'un bouton placé sur le panneau avant. Le rotor qui produit le vortex est constitué d'un plateau où sont fixés quatre ailettes réalisées en tôle épaisse d'alliage d'aluminium. Cette forme plane rudimentaire suffit pour obtenir le vortex. Pour obtenir un vortex stable, il faut fermer le plus possible la paroi verticale, ce qui n'est pas possible si l'on veut rendre le dispositif interactif. Le public doit toucher le vortex constitué par de très fines gouttelettes d'eau pour en faire varier la trajectoire ou la stabilité. Notons que si l'ouverture avant est

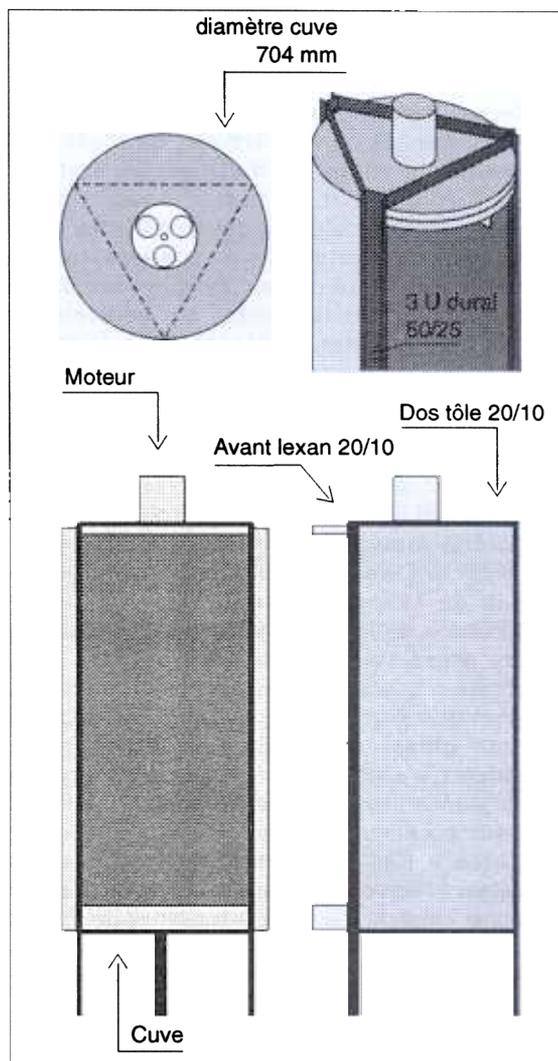
182

Figure 11



Vue générale de la manipulation.

Figure 12

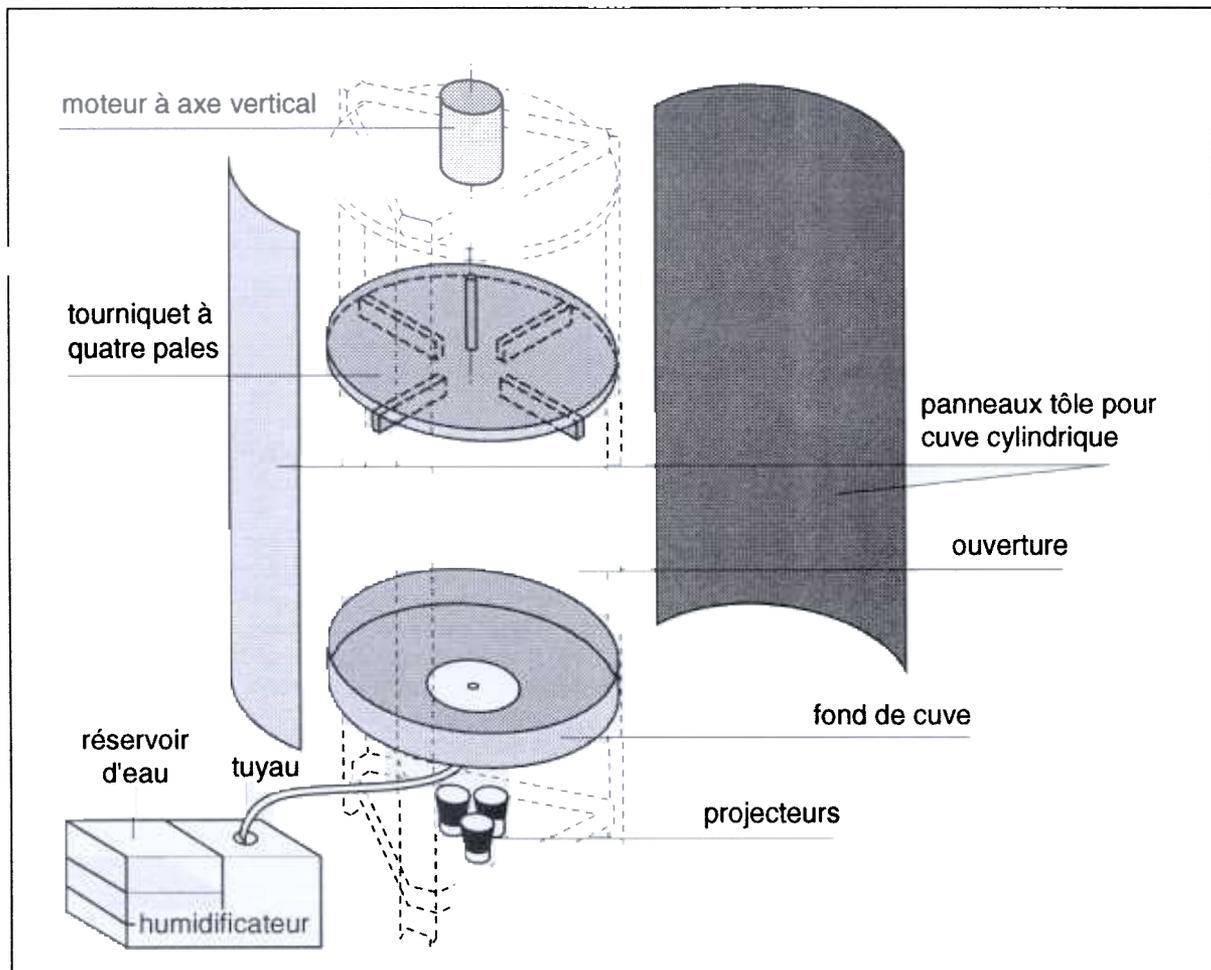


Éléments de la manipulation.

grande, le vortex, sensible au moindre déplacement d'air, disparaît lorsque qu'un visiteur passe devant. De plus, pour des raisons de sécurité, il faut éviter que le public touche le rotor en fonctionnement, ce qui oblige à obturer la partie supérieure de l'ouverture. Notre ouverture de l'ordre de 100° d'angle est trop grande, le moindre mouvement d'air dégrade le vortex. Les spots lumineux ont une

lumière jaune orangé. L'intérieur de la paroi cylindrique est peinte en noir mat. L'humidificateur produit des micro-gouttelettes par émission d'ondes ultrasoniques. Cet appareil se fait aujourd'hui très rare car si on ne le remplit pas avec de l'eau distillée, les sels se déposent sur la surface de l'émetteur et lorsqu'il n'y a plus d'eau, celui-ci pulvérise de la poudre blanche dans la pièce à humidifier.

Figure 13



Production d'un tourbillon en éclaté.