

Au sujet d'une observation de Colladon au pont de la Machine à Genève

On an observation by Colladon at the machine bridge Geneva

par G. DARRIEUS,

MEMBRE DE L'INSTITUT,
INGÉNIEUR EN CHEF A LA COMPAGNIE ÉLECTRO-MÉCANIQUE

Interprétation physique () d'un tourbillon hélico-centripète à axe horizontal observé sur le Rhône à Genève immédiatement en amont d'un barrage et pour certaines dispositions d'ouverture des rideaux.*

*Cette circulation au sein d'un écoulement presque irrotationnel trouverait son origine dans la préexistence d'une rotation due au frottement sur le fond du lit et telle que la révèle le profil des vitesses. Le phénomène hydraulique peut être assimilé à certains phénomènes atmosphériques, tels que les trombes et les colonnes de fumée de grand diamètre, dont l'auteur trouve une explication dans la rotation terrestre, génératrice des cyclones tropicaux. Enfin, un autre phénomène hydraulique du même genre est celui de la prise d'eau froide de l'énergie thermique des mers décrit ici même il y a quelques années par les Ets Neyrpic (**).*

Physical interpretation () of a helico-centripetal, horizontal vortex observed in the Rhone at Geneva immediately unstream from a dam and for certain dispositions of the gate opening. The circulation in the middle of an irrotational flow would originate from the diffusion of turbulence due to friction on the bottom as is revealed by the velocity distribution. The hydraulic phenomenon might be compared to certain atmospheric phenomena, such as waterspouts and the large diameter columns of smoke, for which the author finds an explanation in the earth's rotation, generator of tropical cyclones. Finally another hydraulic phenomenon of the same type is that of the cold water intake thermal energy from the sea, described in la Houille Blanche by Ets Neyrpic (**)* some years ago.

Bien que le pont de la Machine existe toujours, il ne semble pas que les Genevois aient gardé le souvenir du « serpent d'eau » décrit par COLLA-

DON en 1890 (1), peut-être parce qu'il ne se produit que pour certaines dispositions des ouvertures du barrage à rideaux.

Rappelons que ce phénomène consiste en l'apparition, à environ un mètre au front du barrage, d'un long tourbillon horizontal de 8 à 15 m, que rend visible le noyau d'air très approximativement cylindrique, de 1 à 10 cm de diamètre, déterminé par la cavitation. Bien que le phénomène commence aux extrémités, en deux tronçons qui se rejoignent d'ailleurs en un temps très court, la forme de ces extrémités, recourbées vers l'aval, ne joue évidemment pas de rôle essentiel, sinon pour rendre compte peut-être des condi-

(*) L'interprétation mathématique du phénomène fait l'objet d'un mémoire antérieur de M. G. DARRIEUS : « Entretien par extension suivant son axe, d'une trombe rectiligne dans un fluide visqueux. » (Extrait des *Mémoires sur la Mécanique des Fluides*, offerts à M. D. RIABOUCHINSKY, à l'occasion de son jubilé scientifique. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air « hors série ».)

Un certain nombre de ces extraits obligeamment offerts par l'auteur au Comité technique de la S.H.F. sont déposés au secrétariat et peuvent être adressés aux membres intéressés, sur demande et jusqu'à épuisement.

(**) A. CRAYA et P. GABRIEL : « Recherches théoriques et expérimentales sur l'écoulement dans un fluide hétérogène stratifié. » (Mémoire présenté au Comité technique de la S.H.F. le 19 novembre 1946 et publié dans le compte rendu du Congrès de la Mécanique Appliquée de 1946.)

(1) Daniel COLLADON. — Sur une trombe d'eau dont la bouche est en bas, dont le corps est horizontal et peut avoir quinze cents fois son diamètre. *Arch. d. Sc. Phys. et Nat.*, t. XXIV, août 1890, Genève, et *C. R. Ac. d. Sc.*, t. III, p. 449 (1890); également mentionné dans le *Cours de Physique* de BOUASSE : Tourbillons, 1, p. 95.

tions d'un accès éventuel plus ou moins étranglé de l'air extérieur au noyau de la trombe, dans lequel règne une dépression en général modérée, qui peut suffire à expliquer un entretien du noyau d'air par dégagement de l'air dissous.

Si COLLADON, dans sa controverse avec l'astronome FAYE, insiste sur ce que ces extrémités, sans doute par suite de l'ouverture partielle des rideaux, sont courbées vers le bas, c'est pour contester la généralité, affirmée par FAYE, de l'orientation opposée observée dans d'autres cas, par exemple dans les entonnoirs qui débouchent à la surface des eaux courantes.

Mais la circonstance essentielle dont dépend l'explication du phénomène, réside bien entendu dans les conditions amont, à savoir l'existence, au sein du courant fluide, d'une circulation autour du noyau, laquelle, en l'absence d'aucun organe tel que volute ou aube directrice (*) susceptible de créer cette circulation dans un écoulement irrotationnel, ne peut trouver son origine que dans une rotation distribuée au sein du fluide, telle qu'en détermine normalement, par diffusion de la turbulence, le frottement sur le fond du lit, et telle que la révèle le profil des vitesses.

Dans ces conditions, le mouvement hélico-centripète, quasi de révolution au voisinage du noyau, que détermine l'étirement des filets de courant et de tourbillon de part et d'autre du plan de symétrie, doit donner lieu, suivant le théorème d'HELMHOLTZ, en l'absence de dissipation, à une augmentation continue au cours du temps de l'intensité tourbillonnaire et des vitesses de circulation; d'où résulte l'apparition d'une cavitation.

Notre calcul qui traite pour simplifier le cas, valable au voisinage du noyau, d'un écoulement strictement de révolution, s'appliquerait plus exactement à l'espace aval des directrices d'une turbine centripète Francis ou Kaplan, en l'absence de la roue, ou, dans le cas d'un rotationnel préexistant au sein du fluide, à la vidange, par un trou central, d'un réservoir cylindrique tournant autour d'un axe vertical.

Le résultat de ce calcul est la mise en évidence de ce que, comme il était à attendre, les vitesses en jeu ne sont pas si faibles que la viscosité de l'eau ait une influence sensible sur l'évolution de l'écoulement, sauf au voisinage immédiat de l'axe du tourbillon, ou de la surface du noyau quand il y a cavitation; de sorte que l'explication du phénomène demeure indépendante, dans ses grandes lignes, du caractère non parfait du

fluide, si toutefois l'existence préalable d'une rotation qui, elle, résulte de la viscosité et de la turbulence, est considérée comme donnée.

Toutefois la persistance éventuelle, au voisinage du noyau, malgré les faibles vitesses en jeu et le caractère à peu près laminaire de l'écoulement, d'une certaine turbulence résiduelle superposée à la rotation d'ensemble, pourrait amener à substituer à la viscosité vraie une viscosité apparente beaucoup plus grande, au sens de REYNOLDS, BOUSSINESQ, PRANDTL, G. I. TAYLOR, etc.

BOUASSE consacre plusieurs pages de son grand *Traité de Physique (Tourbillons, t. V)* à des observations de trombes atmosphériques. COLLADON raconte ainsi avoir vu en juillet, vers midi, les menus objets d'une lessive abondante étendue sur le sol d'une place, subitement enlevés en tourbillonnant jusqu'à une hauteur d'environ 600 m, et dispersés au loin par une trombe qui paraissait avoir au plus 2 m de diamètre. PICTET décrit également en détail les trombes de 2 à 3 m de diamètre et paraissant atteindre 500 à 1 000 m de hauteur qu'il a observées en Egypte au voisinage du Caire, de mars à octobre, au milieu du jour, et qui, rendues visibles par le sable entraîné, paraissent alimentées par la couche d'air surchauffé qui surmonte le sol, où un thermomètre enfoui marque 84°, tandis que la température de l'air, 35° à l'ombre, atteint 52° au centre de la trombe.

REDFIELD (1839) décrit, parmi trois cas d'immenses feux de branchages, celui concernant un amas circulaire bien sec provenant, après enlèvement du bois de charpente, du défrichement de 14 hectares de forêt, et allumé sur tout le pourtour, un jour d'été parfaitement calme. La colonne de fumée, s'élevant verticalement aussi haut que la vue pouvait atteindre, et accompagnée d'un crépitement sourd, coupé d'explosions comme le roulement du tonnerre, tourbillonnait avec une vitesse suffisante pour soulever à une vingtaine de mètres de jeunes arbres de 20 cm de diamètre couchés sur le sol.

Des observations analogues ont été faites lors de grands incendies de bâtiments en bois, ou de forêts, notamment dans les Landes. Malheureusement, aucune des relations ci-dessus ne comporte l'indication du sens de rotation.

Or, bien que l'on puisse douter à première vue, avec BOUASSE, que la rotation terrestre, cause manifeste des grands cyclones tropicaux, doive expliquer aussi les phénomènes à plus petite échelle ci-dessus, on voit mal quelle autre cause fortuite mais soutenue pendant des heures (de 10 h. du matin à 3 h 30 de l'après-midi, dans le cas d'une des trombes de sable décrites par PICTET), telle qu'une rotation locale préexistante ou dissymétrie du vent, pourrait rendre compte, par

(*) Peut-être toutefois le décollement de la couche limite que détermine sur le fond, au voisinage de l'obstacle, le ralentissement du courant (fig. 1 de notre mémoire précité) joue-t-il ce rôle dans une certaine mesure.

temps calme, de la régularité et de la persistance de ces phénomènes.

La composante zénithale $\omega \sin 50^\circ$ de la rotation terrestre à la latitude 50° , environ $5,5 \cdot 10^{-4}$ rad/s, correspond, pour un rayon de 100 m dans le plan horizontal, à une vitesse ωr d'entraînement du sol par rapport au système de référence d'orientation fixe, de $5,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^2 = 5,5$ cm/s. Il suffit de supposer que les masses d'air primitivement au repos relatif sur un cercle de ce rayon, se trouvent aspirées par la trombe sur un rayon cent fois plus petit, pour rendre compte, par simple conservation de la circulation, de l'apparition de vitesses tangentielles de 5,5 m/s au contour même de la trombe de un mètre de rayon. L'hypothèse d'un rayon initial de 1 000 m, soit dix fois plus grand, conduirait à des vitesses finales cent fois plus grandes.

Il est vrai que l'appel en moins d'une heure de masses d'air aussi éloignées que même 100 m, peut paraître invraisemblable, si le foyer aspirant, feu ou trombe, se comporte comme un « puits » au sens aérodynamique, c'est-à-dire détermine, comme on le vérifie d'ailleurs autour d'une crépine, un champ de vitesses induites à symétrie sphérique. Le demi-volume d'une sphère de 100 m de rayon, 2 millions de m^3 , est en effet bien supérieur à celui qui peut être aspiré par la trombe dans le temps de sa formation.

Mais la difficulté est levée s'il est admis que l'aspiration s'exerce seulement sur la couche d'air plus chaude et plus légère située au voisinage du sol, et dont le volume, pour un rayon de 100 m et une épaisseur d'un mètre, n'est que de 7 800 m^3 , de sorte que le débit de 6 m^3/s (dû par exemple à un courant ascendant de 2 m/s dans une trombe de 3 m^2 de section) suffirait à faire apparaître en vingt minutes la rotation calculée plus haut de 5,5 m/s.

Une telle aspiration sélective peut résulter de l'instabilité naturelle de l'atmosphère, qui se développe par l'effet de l'échauffement solaire, lorsque le gradient vertical de température a dépassé le gradient adiabatique, normalement réalisé pour l'air d'humidité moyenne dans la troposphère. L'appel d'air constitué par la trombe rassemble alors en un seul la multitude des filets chauds qui, demeurant dispersés en son absence, se frayent un chemin vers le haut à travers les masses plus froides, pour tendre à rétablir le gradient adiabatique.

Une autre raison de cet appel d'air par tranches horizontales ou cylindriques, qui fait décroître la composante centripète de la vitesse le long du rayon r en $1/r$, c'est-à-dire beaucoup plus

lentement que l'appel sphérique en $1/r^2$ d'un « puits », est l'effet d'éjecteur étudié par PRANDTL et calculé par TOLLIEN, associé à l'épanouissement d'un jet tel que le réalise la colonne de feu ou la trombe.

L'aspiration n'est alors plus localisée au foyer ou au pied de la trombe, mais plus ou moins distribuée sur toute la hauteur de la colonne ascendante.

Enfin, un troisième cas de conditions « baroclines » où la pression n'est pas fonction uniforme de la densité, et qui échappe à l'application générale du théorème de CAUCHY-HELMHOLTZ, est celui, analogue à la prise d'eau froide de l'énergie thermique des mers étudié et décrit ici-même il y a quelques années par la Société Neyrpic, où une inversion du gradient vertical de température au voisinage du sol, plus froid que l'air, par l'effet du rayonnement nocturne, réalise, comme dans la stratosphère, une stabilité naturelle, dans le champ de la pesanteur, des couches inférieures stratifiées, que tend à respecter l'appel du foyer et de la trombe.

C'est ainsi que l'expérience a réfuté les objections, d'ailleurs assez peu fondées en principe, de ceux qui doutaient, à l'origine du procédé CLAUDE-BOUCHEROT, de la possibilité d'aspirer l'eau froide des profondeurs, sans provoquer à la longue l'appel simultané des eaux plus chaudes de surface.

Dans le cas du serpent d'eau, un des résultats de notre calcul est de montrer qu'en écoulement laminaire, le freinage de la circulation auquel donne lieu au voisinage du noyau la viscosité, avec reflux par diffusion, de l'intensité tourbillonnaire vers l'amont, ne suffit pas à consommer l'apport convergent de cette intensité tourbillonnaire dans le cas où elle préexiste au sein du fluide, ni à expliquer que cette circulation n'augmente pas au cours du temps comme dans le cas des trombes atmosphériques dues à la rotation de la terre.

Il paraît nécessaire d'admettre que le caractère sensiblement irrotationnel de l'écoulement est dû à ce que les filets liquides qui concourent à alimenter la trombe, proviennent en majeure partie de la tranche supérieure rapide du courant amont, celle qui contient le sommet (ou maximum) du profil des vitesses et au voisinage duquel le gradient vertical de la vitesse en lequel se réduit ici le rotationnel, est faible, voire négatif (près de la surface); tandis que les filets tourbillonnaires mais plus lents, voisins du fond, ne contribueraient que peu ou point à cette alimentation.

DISCUSSION

M. le Président HUPNER remercie M. DARRIEUS et le félicite d'avoir fait un savant exposé sans en exclure une facile intelligibilité. Il indique que, d'accord avec M. BARRILLON, il a prié M. DELATTRE de se renseigner à Genève sur la persistance du phénomène constaté par COLLADON vers 1890 (*).

M. le Président se demande s'il n'y a pas eu d'observations sur les fumées provoquées par l'incendie des dépôts de pétrole dans la région de Rouen en 1940 et si l'on peut rapprocher le phénomène des observations faites par l'Administration des Eaux et Forêts dans les Landes où la défense contre le feu consiste parfois à allumer un autre feu.

M. CALLET rappelle que, selon certains témoignages, les trombes dues à la stratification des couches d'air au cour des incendies monstres de Hambourg entraînaient et renversaient les hommes.

M. de ROUVILLE pense qu'une indication sur la manifestation de trombes produites par le feu pourrait être donnée par l'inclinaison des câbles des ballons-sondes captifs. Il remarque que le site de Genève, placé dans une cuvette de montagnes, doit être favorable à la formation de ces trombes. D'autre part, la répartition des vitesses dans l'écoulement liquide considéré influe sans doute sur la formation du tourbillon, bien qu'il soit difficile de réaliser un écoulement de vitesse constante sur toute la profondeur.

M. BERGERON confirme que, dans un courant, l'inégalité des vitesses peut créer un mouvement de rotation dont l'axe est perpendiculaire à l'écoulement; par exemple, pour une pompe à axe vertical, le décalage de la tubulure d'aspiration par rapport à l'axe du canal d'amenée crée dans ce dernier un déséquilibre des vitesses qui engendre dans certains cas un mouvement de rotation genre Vortex dans la tuyauterie d'aspiration de la

pompe. Ce mouvement de rotation contrarie l'entrée normale de l'eau dans la roue et peut rendre la pompe bruyante.

Sur la demande de M. BERGERON, M. DARRIEUS rappelle que l'existence d'une circulation dans les turbo-machines est due à la formation de tourbillons fictifs, non portés par le fluide mais liés à la forme de l'aube, de sorte que le fluide se retrouve, à la sortie de la couronne distributrice, avec un mouvement dont la génératrice est, dans le cas d'un écoulement plan, une spirale logarithmique, mouvement irrotationnel, mais qui a une circulation.

M. le Président se demande si le rapport de la profondeur à la largeur de l'obstacle joue un rôle. Il suggère à M. DARRIEUS de demander à M. BLOSSET et à M. GILBERT, ingénieurs en chef des Services de la Navigation de la Seine à Paris, si des phénomènes de ce genre ont pu être observés sur les barrages mobiles en service sur la Seine.

M. REMENIERAS signale qu'un serpent d'eau existait à la prise d'eau de la Glaire près de Luchon. Il essaiera d'obtenir des renseignements à ce sujet si, toutefois, la prise n'a pas été modifiée entre temps.

M. Le Président suggère de demander à M. ESCANDE, qui a fait des études sur modèles réduits de barrages à plusieurs passes, s'il n'y a pas observé un phénomène semblable à celui décrit par M. DARRIEUS et qui d'après celui-ci, pourrait être épuré et rendu plus accessible à la théorie dans une étude sur modèle.

M. REMENIERAS rapproche l'observation de COLLADON de celle relatée par M. SIMONIN dans son ouvrage : « La préparation et l'épandage simultanés des liants routiers » (**). Dans ses expériences sur un type de cyclone dit « cylindre-spiral », M. SIMONIN a constaté la formation dans l'axe dudit cylindre, d'un Vortex aéré analogue au « serpent d'eau » étudié par M. DARRIEUS.

(*) Les renseignements, adressés postérieurement à la séance, par M. DELATTRE à M. le Président HUPNER, confirment la persistance du phénomène dans certains cas d'ouverture des vannes.

(**) BERNIGAUD et PRIVAT, Dijon, 1945.

