

Le cycle de l'eau au siècle des lumières

Aperçu à partir d'un texte historique et prétexte à un certain regard sur l'hydrologie

Adaptation et commentaire

CHANTAL GASCUEL-ODOUX

S'intéresser à l'histoire des sciences et, plus particulièrement, de sa propre discipline (en l'occurrence l'hydrologie) n'est pas simplement faire preuve de curiosité d'esprit. Cela ne se réduit pas non plus à l'exercice amusant, mais facile et vain, de comparer les connaissances d'aujourd'hui aux idées fausses d'hier. Cela permet de prendre de la distance par rapport à sa pratique de recherche – et, partant, de mieux la conduire – en en comprenant mieux les ressorts, y compris le contexte général (intellectuel, social, économique, politique) dans lequel elle se situe. Cela dit, être spécialiste dans un domaine quelconque ne fait pas de soi un historien des sciences. C'est pourquoi il a paru intéressant de confronter deux lectures d'un même texte du XVIII^e siècle. On trouvera ci-après celle de l'hydrologue. Dans le prochain numéro de NSS, on pourra lire celle de l'historien.

Le texte qui suit est extrait de l'ouvrage de l'abbé Pluche datant de la première partie du XVIII^e siècle et intitulé : « Spectacle de la nature ou Entretiens sur les particularités de l'histoire naturelle, qui ont paru les plus propres à rendre les jeunes gens curieux et à leur former l'esprit ». Cet ouvrage est une encyclopédie éducative très répandue de l'époque. Elle est écrite sous forme dialoguée, renforçant le caractère pédagogique du texte : un « chevalier », jeune homme ignorant et curieux, pose pas à pas des questions auxquelles un « professeur » répond par la mise en relation d'observations et un argumentaire. L'extrait choisi porte sur la démonstration du cycle de l'eau. Ce texte est à la fois séduisant et passionnant. D'un point de vue littéraire, il manie remarquablement bien l'art d'une écriture simple et claire. D'un point de vue scientifique, il constitue une illustration du raisonnement déductif, du bon sens dans la manière d'appliquer le principe de causalité, parfois de façon amusante lorsque l'interprétation est incroya-

blement erronée. D'un point de vue pédagogique, Pluche a pu être considéré comme l'inventeur de la leçon de choses, mettant en avant l'observation, préparant l'avènement des sciences de la vie et de la nature. La forme du texte d'origine a été conservée de façon à ne pas dénaturer l'historicité du texte. Seules quelques digressions, qui auraient fait perdre le fil de la démonstration et auraient rendu le texte trop long et impubliable, ont été supprimées. Un plan grossier marquant les étapes du raisonnement, selon les différentes hypothèses du cycle de l'eau, selon les différents termes du bilan de l'eau, a été ajouté sous forme de titres marqués en italique et alignés à droite. L'orthographe a été actualisée.

Ce texte présente l'intérêt de pouvoir servir de base à une réflexion sur les démarches scientifiques actuelles, à partir de l'exemple du cycle de l'eau. Après l'avoir situé dans le contexte de l'histoire de l'hydrologie, on s'intéressera aux enseignements que l'on peut en tirer.

CHANTAL GASCUEL-ODOUX
Inra, Unité sol et agronomie
de Rennes-Quimper,
65, route de Saint-Brieuc,
35042 Rennes Cedex
Tél. : 02 99 28 52 27
Fax : 02 99 28 54 30
> cgascuel@roazhon.inra.fr

Extrait de

« Spectacle de la nature ou Entretiens sur les particularités de l'histoire naturelle, qui ont paru les plus propres à rendre les jeunes gens curieux et à leur former l'esprit »
Pluche, 1735

*La problématique : par quelle route,
par quels mécanismes,
les eaux font-elles leur chemin ?*

Le Pr. Les montagnes, il est vrai, sont propres par leur élévation sur les plaines, à fournir à celles-ci l'arrosage qui leur est nécessaire. Mais qui est-ce qui arrosera les montagnes ? Je ne vois plus au-dessus d'elles de réservoirs qui puissent livrer de quoi entretenir les courants d'eau perpétuels.

Le Chev. Mais Monsieur, ce n'est pas au-dessus des montagnes qu'il faut chercher les réservoirs des fontaines, c'est dans les entrailles de la terre. Il faut aller jusqu'à la mer. Les fontaines s'écoulent dans les rivières. Les rivières se déchargent dans la mer. Celle-ci regorgerait si elle ne rendait aux montagnes ce que les rivières lui donnent.

Le Pr. Cela est indubitable : mais il y a loin de la mer à la montagne. Par quelle route, par quel mécanisme, les eaux font-elles ce chemin ?

Le Chev. Voilà le point de la difficulté.

Les trois hypothèses

Le Pr. Il n'y a là-dessus que trois sentiments parmi lesquels on puisse choisir. Les autres, de l'aveu de tout le monde, ne méritent point d'être rapportés, moins encore d'être réfutés.

Le premier sentiment est celui de Monsieur Descartes, qui croyait que l'eau de la mer se répandait sous terre de tout côté, et que trouvant au pied des montagnes des ouvertures spacieuses et un degré de chaleur capable de la faire monter en vapeurs sans élever avec elle les sels que leur poids fait demeurer au fond, le haut des cavernes arrêtait et épaississait cette vapeur, et en formait des ruisseaux, comme le couvercle d'un alambic résout en eau la vapeur qui s'y attache.

Le second sentiment est celui qui suppose la terre assez poreuse pour admettre partout le passage des eaux, et assez serrée pour les épurer et les dégraisser de leur sel, en sorte que l'eau, quoique venue de la mer, entre douce et potable dans les fontaines et les rivières.

Le troisième système consiste à prétendre que la mer n'a point de communication avec les montagnes par-dessous terre, mais par-dessus ; que des rivières, des lacs et de toute la mer, il s'élève continuellement une vapeur qui est emportée dans l'étendue de l'air en forme de nuée ou de brouillards ; qu'elle suit l'impression des vents et que selon qu'elle rencontre un air froid ou se trouve arrêtée par les montagnes, elle se condense et se résout en rosée, en neige, en pluie ; que les eaux qui en proviennent trouvent ensuite diverses ouvertures pour s'insinuer dans le corps des montagnes et des collines, où elles s'arrêtent sur des lits, tantôt de pierre, tantôt de glaise, et forment, en s'échappant de côté par la première ouverture qui se présente, une fontaine passagère ou perpétuelle, selon l'étendue et la profondeur du bassin qui les rassemble (...).

L'hypothèse de l'alambic

Le premier sentiment qu'expose le Père Rapin peut se défendre en deux manières. Ou bien en ce sens que l'air extérieur chargé de vapeurs ou d'humidité se condense en eau dans les bassins des montagnes, ce qui revient toujours au sentiment de ceux qui rappellent l'origine des fontaines à la pluie et aux vapeurs. C'est ce que nous examinerons en son lieu. Ou bien ce premier sentiment se rapporterait à celui de M. Descartes et supposerait que l'eau de la mer parvient librement au pied des montagnes pour y élever ensuite une nuée de vapeur qui s'amasserait en gouttes aux parois des rochers, ce qui ne paraît pas conforme à la vérité. Car d'abord c'est fort gratuitement qu'on suppose des passages libres et ouverts depuis le lit de la mer jusqu'au pied des montagnes. On n'a pu justifier l'existence de ces tuyaux par aucun fait, et au contraire toutes les fois qu'on a trouvé des eaux courantes sous la terre, on a observé qu'elles allaient des montagnes à la mer, et non de la mer vers les terres.

Mais n'apportons point d'obstacles au cours des eaux : laissons les librement arriver à point nommé au pied des montagnes. Qu'y produiront-elles ? On prétend qu'elles y trouvent un degré de chaleur suffisant pour les élever en vapeurs dans les cavernes des montagnes, et que rencontrant le froid des voûtes et des parois de ces cavernes, elles s'y condensent, comme au couvercle d'un alambic, et trouvent des ouvertures pour s'échapper à l'air et couler sur les plaines. Mais dans tout ceci on arrange les choses comme on voudrait qu'elles fussent, et non comme elles sont en effet. Je veux que les eaux de la mer aillent par-dessous terre chercher à deux et trois cents lieues le pied des hautes montagnes : où sont, je vous prie, les fourneaux exactement préparés et entretenus sans interruption pour élever l'eau en vapeurs ? Je veux qu'il se trouve sous terre un degré de chaleur capable de raréfier l'eau et d'en élever des nuages : où sont les cavernes de six et sept cents pas de hauteur qui puissent condenser ces nuages par le froid de leur voûte ? On a assez creusé et visité tout l'intérieur de la terre et des montagnes, jamais on n'a trouvé de cavernes où les vapeurs puissent s'élever en liberté jusqu'à la hauteur des fontaines qui donnent naissance aux rivières. Tous ces merveilleux alambics sont de pures imaginations.

J'aperçois une nouvelle raison de les rejeter. Quand nous réunirions sous les montagnes l'eau de la mer, la chaleur suffisante pour la faire monter en vapeurs, et des cavernes assez hautes pour élever la vapeur jusqu'au milieu des hautes montagnes, nous ne tiendrions rien encore. Nous n'y gagnerions pas le moindre ruisseau d'eau douce. Les vapeurs, en s'attachant à la voûte et aux murailles, ne s'arrêteraient pas en haut pour y former une fontaine qui coule de côté, mais elles retomberaient toujours dans le bassin d'où elles seraient parties.

Le Pr. Votre remarque est fort juste. J'y joindrai deux autres preuves de fait qui achèveront de vous faire sentir la pauvreté de ces alambics qui plaisaient si fort à Monsieur Descartes. Je tirerai l'une de ce qui se passe hors de la terre, et l'autre de ce qu'on a observé sous la terre.

Après une longue interruption des pluies, soit en été, soit en hiver, la plupart des fontaines tarissent : plusieurs rivières sont presque à sec, les plus grandes couvrent à peine le fond de leur lit. Qu'importe à l'eau souterraine qu'il pleuve ou qu'il ne pleuve pas, pour s'élever en vapeurs ? Son opération en est indépendante. L'eau est dans l'alambic : le couvercle est mis, le fourneau est allumé à l'ordinaire, pourquoi la distillation ne se fait-elle plus ? Si ces distillations étaient la cause des fontaines, comme cette cause serait toujours suffisante, l'effet n'en manquerait jamais : la sécheresse du dehors n'y pourrait rien déranger, ce qui est contraire à l'expérience. Voyons à présent ce qui se passe sous terre. Nous n'y trouverons rien qui nous autorise à admettre ces évaporations prétendues qui s'élèvent du pied des montagnes vers le haut, pour se résoudre ensuite en des amas d'eau qui s'écouleraient de côté. On a visité une multitude infinie de grottes et de cavernes, tant grandes que petites. Les unes se sont trouvées parfaitement sèches, et par

conséquent sans communication avec les eaux de la mer. Les autres se sont trouvées incrustées de fleurs durcies et cristallisées avec le temps, donnant passage à quelques courants d'eau, ou enfin distillant de leur voûte quelques gouttes d'eau qui s'amassent dans le fond. Mais ces fleurs, qui en transpirant à travers des voûtes, s'y épaississent en croûtes de pierres ou de cristal, ne proviennent, de l'aveu de tous les connaisseurs, que des eaux de pluies, qui en passant à travers des terres et des voûtes, entraînent des sels et des sables fins qui s'unissent et s'allongent en pointes, en culs de lampe, ou par manière de branches renversées. La mer n'a visiblement aucune part à cet ouvrage. Les courants d'eau qui passent au travers de certaines cavernes proviennent, pour le sûr, des pluies qui pénètrent les terres, puisque les courants diminuent et se séchent quelquefois totalement, à mesure que la sécheresse augmente. Enfin les distillations qu'on trouve sur les parois de certaines cavernes n'ont aucun rapport aux eaux de la mer, puisque ces eaux marines ne se trouvent point au fond de la grotte et que les voûtes reçoivent visiblement toute leur fraîcheur des eaux de pluie qui y parviennent, et dont la longue interruption est toujours suivie du dessèchement entier de la caverne. On en trouve la preuve dans les cavernes de l'Observatoire, où l'eau a cessé de couler quand les années ont été fort sèches.

L'hypothèse de la filtration

Le chev. A ce que je vois, l'eau de la fontaine auprès de laquelle nous nous sommes assis n'a passé par aucun alambic. Mais peut-être vient-elle de la mer en droite ligne jusqu'ici, en déposant son sel de côté et d'autre au travers des terres, en s'épurant ainsi à force de se frotter aux rochers et aux sables qu'elle rencontre, comme fait l'eau d'une fontaine sablée. Ce sentiment que le Père Rapin a si heureusement exprimé et qui paraît être le sien a l'air vraisemblable.

Le bilan des sels

Le Pr. Il est précieux, j'en conviens, mais examinons d'abord s'il est à propos de s'en contenter. J'ai d'abord quelque peine à concevoir ce que peut devenir le sel que tant de fontaines et de rivières ont dû déposer sous terre. Il y a 10 000 ans que la mer, selon ce système, envoie son eau et ses sels vers les sources des rivières, et que les rivières ne lui renvoient que de l'eau sans sels. Il en devrait être arrivé peu à peu, ou que la mer fut dépouillée de tous ses sels, ou que la terre, chargée de sels, eut fermé le passage aux eaux qui y venaient former les fontaines, comme l'eau de Rongis et d'Arcueil, en incrustant de sables et de sels, les tuyaux par où elle coule, se bouche le passage à elle-même en moins de cinquante ans. Mais il faut tâcher de rendre ce raisonnement plus sensible.

L'eau des rivières, selon l'opinion que j'attaque, vient de la mer, et a déposé en s'infiltrant, tous ou presque tous les sels qu'elle contenait. Examinons ce que les eaux d'une de nos rivières de France peuvent laisser de sel sous terre durant un temps déterminé. Nous trouverons que la Seine seule en un jour déposerait sous terre plus de sel que nos marais salants

n'en donnent pour la provision de la France durant un an (...).

Le célèbre M. Mariotte a exactement observé combien il coule d'eau sous le pont Royal en 24 heures, et il a trouvé que la somme s'en montait à 288 millions de pieds cubes. Mais comme ceux qui prétendent que le principal fond des rivières vient de la mer ne peuvent disconvenir que les pluies ne les grossissent pas, pour un pied cube d'eau douce, contentons-nous du dépôt d'une livre de sel¹ au lieu de deux. L'eau de la Seine, pour s'adoucir, a donc laissé sous terre en un jour la quantité de 288 millions de livres de sel, ce qui est une quantité trois fois plus grande que celle que les marais salants fournissent tous les ans aux gabelles de France (...). Si nous multiplions les 288 millions de livres de sel que l'eau de la Seine a déposé, par les 365 jours de l'année, le produit du sel que la Seine aura déposée sous terre ira à plus de cent milliards de livres. Nous n'avons encore parlé que d'une rivière. Quelles masses de sel se formeront des sédiments de nos autres rivières grandes et petites ?

Le Chev. Si aux rivières de France vous joignez toutes les rivières du monde, ces masses de sel vont devenir plus grandes que des montagnes. Il faudrait au bout d'un an que la terre s'enflât et s'élargît par tous ces accroissements.

Le Pr. Il y a cinq à six mille ans que ces rivières coulent et déposent toujours deux livres de sel pour un pied cube d'eau.

Le Chev. Pour le coup ces filtrations sont impossibles. Il est clair que si l'eau de mer se défaisait de ses sels sous la terre, l'océan en y passant et repassant, aurait perdu sa salure depuis longtemps et que le sel aurait bouché le passage à l'eau.

Comment l'eau marine se dessale-t-elle ?

Le Pr. Essayons de conserver quelque vraisemblance à cette opinion, en disant que ce n'est pas sous terre que se fait cette séparation du sel avec l'eau, mais dans les sables qui couvrent le fond de la mer. On pourra même appuyer cette conjecture, en observant qu'à de très petites distances de la mer, on trouve des fontaines d'eau douce : ce qui me semble prouver que la filtration se fait très promptement et que les sels demeurent toujours au fond de la mer.

Le Chev. Dites-moi, je vous prie, si ces puits se tarissent quelquefois ?

Le Pr. La plupart sont à sec quand les pluies manquent.

Le Chev. Ils proviennent donc des eaux de pluies rassemblées sous terre et non pas de la mer, qui malgré la sécheresse serait toujours en état de les servir.

Le Pr. Votre remarque se peut fortifier par une autre. Si les eaux douces, qu'on trouve souvent dans les petites îles et dans le voisinage de la mer provenaient de la mer par filtration, rien ne serait plus aisé que de dessaler l'eau marine et de lui ôter son amertume : ce qui serait d'un secours infini dans la navigation. Cependant on fait par une infinité de tentatives, qu'en vain on la ferait passer par cent vases et par cent sables différents. Tout ce qu'on peut gagner est

¹ L'ancienne mesure de livre vaut, suivant les villes, entre 380 et 550g. Une livre de sel par pied cube équivaut à une concentration entre 22 et 32,34g/l, à peu près cohérente, pour la seconde, avec la concentration réelle de l'eau de mer de 35g/l.

de diminuer le degré de sa salure : mais malgré les préparatifs les plus vantés, elle conserve un goût salé et bitumineux qui la rend et tout ce qu'on y fait cuire également insupportable. Elle tranche les entrailles de ceux qui en veulent faire usage et répand dans les urines le sang des petits vaisseaux qu'elle a rompus par les pointes de ses sels.

Le Chev. Tout le mal vient peut-être de ce que nous ne savons pas bien filtrer. Dieu l'entend mieux que nous.

Comment se fait l'ascension des eaux ?

J'ai toujours dans l'esprit que l'eau de la mer dépose son sel sur le sable qui lui sert de fond et qu'elle s'élève peu à peu aux travers des sables et des terres qui ont, je ne sais comment, la force de l'attirer. Et il faut bien que le sable et les autres matières attirent l'eau : car aujourd'hui, en mettant un morceau de sucre dans quelques gouttes de café, j'ai remarqué que l'eau montait assez vite jusqu'au haut du sucre. Hier je vis l'eau qu'on avait versée au pied d'un monceau de sable, monter jusqu'à la moitié du monceau. Voilà justement la mer et les montagnes.

Le Pr. C'est l'objection la plus raisonnable qu'on puisse faire. J'y réponds. D'abord, ni les sables ni les terres n'ont cette vertu attractive que vous pensez apercevoir. Si l'eau y monte, c'est parce que l'air qui la presse la fait échapper et monter dans les matières poreuses où l'air grossier n'agit pas librement. Mais cette élévation de l'eau est bornée. On a souvent fait tremper dans l'eau le bout d'un tuyau plein de sable ou de terre bien desséchée. L'eau s'y est élevée dans certains sables jusqu'à 18 pieds² et dans d'autres jusqu'à 32, communément fort en dessous. Personne, que je sache, ne l'a vu monter plus haut. Or quel rapport, je vous prie, y a-t-il entre le mouvement de l'eau que l'air chasse par son poids jusqu'à la hauteur de 32 pieds et le mouvement des eaux qui s'élèveront jusqu'à la moitié d'une montagne qui a mille toises au-dessus des plaines. D'ailleurs l'eau de la mer se ferme à elle-même l'entrée des sables et des terres par une espèce de glu qui couvre tout son fond, et par un amas de sels précipités qui bouchent plutôt les interstices des sables que de les tenir ouverts. Jetez au fond de la mer un morceau de bois, une corde, un vase en un mot ce qu'il vous plaira. Au bout de quelques mois ce que vous y avez laissé tomber en étant retiré, se trouve couvert d'une pellicule, ou d'une couche de glu. Cette colle s'épaissit peu à peu et paraît destinée à empêcher que l'eau ne pénètre partout (...). Mais quand elle pourrait percer les sables et s'insinuer dans les terres, ce ne peut pas être fort avant. Car si elle perdait sa salure dans le sable et qu'elle se filtrait, on la verrait d'abord sortir par les plaines, et surtout par les plaines voisines, avant de gagner les montagnes. C'est cependant ce qui n'arrive point. Pourquoi, je vous prie, tant d'indifférence pour les plaines ? Pourquoi tant de prédilection pour les montagnes ? Mais qu'elle les aille chercher par préférence jusqu'à 2 ou 300 lieues de ses bords : à la bonne heure. Comment fera-t-elle pour s'élever jusqu'à 5 ou 600 toises dans les montagnes, elle qui ne peut s'élever tant soit peu au-dessus de son niveau

pour arroser les plaines ? Je veux qu'une forte marée élève l'eau de la mer dans le cœur des hautes montagnes. Quelle main l'arrête à la moitié ? Qui l'empêche d'achever et d'en gagner le sommet ? C'est cependant ce qu'on n'a jamais vu. Si l'eau, par la pression de l'air ou par attraction des terres, pouvait s'insinuer partout, toute la terre en serait bientôt trempée, et la mer sortirait bientôt de son lit pour se glisser dans les plaines et dans les montagnes. La terre deviendrait une éponge.

Mais alors d'où viennent les salines ?

Le Chev. Je vous avoue que je ne comprends pas ce qui peut pousser les eaux de la mer dans les terres, ni leur interdire si régulièrement l'accès des plaines et du sommet des montagnes. Mais c'est un fait qu'il y a des eaux de mer à plus de cent lieues de la mer.

Le Pr. Vous nous devez, s'il vous plaît, la preuve de ce fait dont je n'ai aucune connaissance.

Le Chev. N'y a-t-il pas à Salins en Franche Comté des puits de sel inépuisables ? D'où peut venir l'eau salée qu'on en tire toujours, si ce n'est de la mer ? Il y a quelques mois, je me trouvais dans un endroit où un habile mathématicien était venu par ordre du Roy pour travailler à certaines lignes qui ont rapport à la carte de France. Il nous fit un récit fort curieux de ce qu'il avait vu dans les mines de Willifca en Pologne. Selon lui, on en tire le sel depuis plus de quatre cent ans. Il faut donc que la mer fournisse à l'entretien des mines. Ainsi l'eau de la mer s'insinue réellement fort avant dans les terres (...).

Le Pr. Vous a-t-on dit, Monsieur, que les endroits qu'on avait creusés se remplissaient ensuite d'un nouveau sel.

Le Chev. Non, mais il me semble que cela doit être. Autrement, à force de tailler dans ces carrières, on n'y trouverait plus rien.

Le Pr. Si elles fournissent longtemps c'est que la masse est abondante. Croyez-moi, Monsieur, la mer n'envoie pas le moindre filet d'eau, ni le moindre grain de sel dans ces mines. Ce sont des filons ou des couches de sel qui subsistent en ces lieux et dans bien d'autres, ou dès le commencement du monde, ou depuis le bouleversement causé à la terre et à la mer par le déluge. Bien loin qu'elle vienne de la mer, aucune eau salée qui entretienne ces mines. Vous voyez au contraire un ruisseau d'eau douce qui provient indubitablement des eaux de pluie, puisqu'il manque et s'affaiblit dans le temps de sécheresse, et qui, après avoir traversé ces mines, se perd sous terre et va regagner la mer par-dessous le niveau de celle-ci, comme j'espère vous le prouver (...). Les eaux de Salins, celles de Hall en Saxe, et celles de tous les puits salants du monde, ne sont autre chose que des eaux de pluie qui passent par des veines ou des mines de sel qui se trouvent sous terre en plusieurs endroits. Ces eaux y rongent et y délayent le sel qu'elles charrient avec elles dans les puits, où elles sont ensuite reçues et ménagées pour le service des peuples voisins.

Le Chev. Mais ces mines de sel finiraient ou du moins s'affaibliraient beaucoup avec le temps, et l'eau à force de les ronger devrait se trouver plus bas que le fond des puits.

² 18 et 32 pieds valent respectivement 583 et 1037 cm, 1000 toises représentent 1944 mètres.

Le Pr. C'est aussi ce qui arrive. Il faut aujourd'hui, pour avoir l'eau salée, creuser et chercher beaucoup plus bas qu'on ne le faisait autrefois. Ce fait est certain et attesté par M. Rohault.

Le Chev. Cette circonstance de l'abaissement des eaux salées est une preuve parfaite qu'elles roulent sur un lit de sel qui s'use. Je ne vois plus aucun conduit, ni grand, ni petit, par où la mer puisse nous fournir la moindre goutte d'eau, soit douce, soit salée. Allons chercher ailleurs que sous terre l'origine des fontaines, et voyons, je vous prie, comment les vapeurs qui s'élèvent de la mer pourront suffire pour l'entretien des grands fleuves. La chose me paraît bien difficile à concevoir.

L'hypothèse des nuées

Le Pr. J'ai deux vérités à vous prouver, l'une que les vapeurs de la mer sont plus que suffisantes pour fournir d'eau la surface de la terre et le lit des rivières. L'autre, que ce sont les montagnes, qui, par leur structure, arrêtent les vapeurs et les pluies, les rassemblent dans leurs entrailles et forment des courants d'eau intermittents ou perpétuels (...).

Le Chev. Que les montagnes soient propres à ménager une chute aux eaux, cela est évident et ne peut être contesté. La grande difficulté sera de prouver qu'il s'élève de la mer assez de vapeurs pour fournir par jour à la Seine seule 288 millions de pieds cubes (...).

Une estimation de la pluviométrie

Le Pr. Des observateurs aussi judicieux que patients ont mesuré scrupuleusement combien il peut tomber de pouces d'eau sur la terre en un an. En recevant la pluie dans un vaisseau séparé de tout bâtiment, ils observèrent durant plusieurs années quelle était après chaque pluie la hauteur où l'eau était parvenue. Additionnant ensuite toutes ces sommes, ils trouvèrent tant à Paris qu'à Lille, à Londres, à Zurich, à Amsterdam, tantôt 19 pouces, tantôt 20 et 21, rarement au-dessus, rarement en dessous, si ce n'est en quelques années de sécheresse. En sorte qu'on peut assurer que la hauteur de tout ce qui tombe d'eau de pluie en un an, est de 20 pouces environ, en prenant une hauteur commune et moyenne entre le plus et le moins.

Le Chev. Hé bien, Monsieur, toute l'eau qui coule dans les rivières de France dans l'espace d'un an, faisons-la tomber par manière de pluies sur tout le terrain de la France. Croyez-vous qu'elle ne s'élèvera sur ce terrain qu'à la hauteur de 20 pouces.

Le Prof. Vous allez voir, Monsieur, qu'il s'en faut beaucoup. Un pied cube d'eau est à peu près équivalent à 35 pintes de Paris. Il est facile après cela de savoir combien une toise de 20 pouces contient de pieds cubes, combien de pintes et ce qu'il en faut pour faire un muid. Ces connaissances supposées, on examina combien il pourrait tomber d'eau de pluie sur une étendue de terre de 60 lieues de long sur 50 de large, depuis les sources de la Seine, jusqu'à quelques lieues au-dessus de Paris. En embrassant ainsi le terrain traversé par l'Armençon, l'Yonne, le Loing, l'Aube, la Marne et autres rivières qui grossissent la

Seine, on trouva que le produit de la pluie, estimée à 15 pouces seulement, était au bout d'un an de 714 milliards 150 millions de pieds cubes. Jugez quel eût été le total, si on avait mesuré la pluie sur le pied de 20 pouces, au lieu de 15 de profondeur.

Une estimation des débits

Après avoir mesuré la pluie, qui peut fournir à l'entretien de la Seine, il fallut mesurer l'eau de la Seine même, et voir de combien l'une excède l'autre. Pour faire cette comparaison, M. Mariotte choisit le pont Royal où il est clair qu'une partie de ces eaux de pluie doivent se rendre. Il rechercha combien il s'écoulait d'eau en une minute sous les arches de ce pont. La Seine devant le Louvre a 400 pieds de largeur, sur 5 de profondeur moyenne. Je dis moyenne, parce qu'elle a plus de 5 pieds vers le milieu, et qu'elle en a moins vers les bords. 400 pieds multipliés par 5 font 2000. Pour pouvoir juger de l'espace que ces 2000 pieds parcourent en une minute, c'est-à-dire, durant la soixantième partie d'une heure, on jette dans la Seine un bâton, et en jugeant de la vitesse de l'eau par la vitesse du bâton qu'elle emporte, on trouve qu'au sortir des arches, l'eau quand elle est haute et forte, parcourt sensiblement un espace de 250 pieds en une minute. Mais elle va beaucoup moins vite au milieu et très lentement vers le fond où le frottement des terres en arrête la rapidité. Comme elle ne parcourt guère plus de cent pieds en une minute quand elle est fort basse, et qu'alors l'eau du fond fait encore beaucoup moins de chemin, on peut prendre une vitesse moyenne et au lieu de 250 pieds, supposer qu'elle n'en parcourt que 100 en une minute. Les 2000 pieds cubes qui se présentent sous les arches du pont Royal vont vers la surface et au fond à 100 pieds de là une minute après. Ils ont donc fait place derrière eux à autant de fois 2000 pieds d'eau, qu'ils ont parcouru de pieds de terrain.

Le Chev. Cela est clair.

Le Pr. Ils ont parcouru cent pieds de terrain.

Le Chev. Ce sont donc 100 fois 2000 pieds cubes qui se sont écoulés en une minute.

Le Pr. 200 000 pieds cubes d'eau multipliés par les soixante minutes qui composent une heure donneront 12 millions par heure, et 12 millions par heure font en 24 heures 288 millions de pieds cubes.

Le bilan est-il équilibré ?

Comparant enfin le total des eaux de pluie sur les terres voisines de la Seine au-dessus de Paris, à l'estimation de 15 pouces de hauteur seulement, avec le total des eaux qui s'écoulent sous le pont royal en un an, l'eau de pluie se trouve en 10 fois plus grande quantité que l'eau de la rivière, y ayant 714 milliards 150 millions de pieds cubes de pluie, et seulement 150 milliards 120 millions de pieds cubes d'eau de Seine.

Le Chev. L'eau de pluie est donc beaucoup plus que suffisante pour entretenir les rivières. Mais j'appréhende ici quelque méprise. M. Mariotte, dans la crainte que l'eau de la Seine ne lui jouât un mauvais tour, l'a, ce me semble, fait trop chichement couler sous le pont Royal. Il convient que l'eau à la surface parcourt quel-

quefois 250 pieds en une minute, mais à cause de la diminution des eaux en certains temps et du frottement de l'eau inférieure sur le fond, il prétend que le tout ne parcourt que 100 pieds. C'est trop peu, et s'il s'écoule beaucoup plus d'eau qu'il ne dit, la preuve n'est plus la même.

Le Pr. Je vous livre l'eau à discrétion. Voilà qui est fait. Au lieu de 100 pieds, qu'elle en parcourt 200, serez-vous satisfait ? Au lieu de 12 millions de pieds cubes par heure, qu'il s'en échappe 24 sous les arches : ce n'est que le double du produit. L'eau de pluie qui était 10 fois plus abondante que le premier total des eaux de Seine, sera encore double et triple de ce dernier. Que serait-ce, si au lieu de 15 pouces d'eau de pluie, nous en mettons 18 ou 20, qui est la quantité ordinaire ?

Une estimation de la transpiration des plantes

Le Chev. Je me rends. Les rivières trouvent dans les brouillards, dans les neiges et dans la pluie une provision très suffisante pour leur entretien. Mais il se présente ici quelques difficultés dont je vous demanderai la solution. Si la pluie verse plus d'eau sur la terre qu'il ne s'en écoule dans les rivières, que devient le surplus ?

Le Pr. Le surplus qui est très considérable et sert à fournir aux animaux leur boisson, aux plantes leur rafraîchissement et leur nourriture. Toute la terre est couverte de plantes qui sucent de jour par leurs racines, l'eau qui est répandue sous terre, et qui boivent de nuit, par leurs feuilles, l'humidité de l'air qui les environnent. Jugez combien la dépense d'eau est grande pour la nourriture de toutes les plantes, par la quantité qu'il en faut à une seule. Deux feuilles de figuier mises par M. de La Hire dans une fiole pleine d'eau, sucèrent en moins de 10 heures la soixante quatrième partie de cette eau, ce qui ferait une dissipation de la trente deuxième partie en 12 heures, de la seizième partie en un jour et de la totalité en seize jours.

Le Chev. J'étais en peine auparavant de savoir comment la mer qui reçoit sans cesse l'eau des rivières et des fleuves, ne regorgeait point, et n'inondait point les plaines. Mais présentement que les vapeurs versent sur la terre plus d'eau que les rivières n'en rapportent à la mer, me voilà inquiet de savoir pourquoi celle-ci ne diminue pas. Si elle dépense toujours plus qu'on ne lui rend, elle se ruinera peu à peu : elle se doit réduire à rien.

Une estimation de l'évaporation

Le Pr. Votre difficulté qui est très sensible, le deviendra tout autrement, si nous essayons de mesurer, quoique grossièrement, la quantité de vapeurs qui s'élève de la mer. Supposons d'abord, comme nous sommes en droit de le faire par la seule inspection du globe, que la surface de la mer est à peu près aussi grande que celle des terres habitées, et examinons ensuite si la quantité de pouces d'eau qui s'élèvent de la surface des mers, est plus ou moins grande que la quantité des 18 ou 20 pouces de pluie qui arrosent les terres.

Quand on expose un poëlon plein d'eau au grand air, lorsqu'il fait fort chaud et que le vent souffle, il s'en évapore un pouce d'eau en 24 heures. En d'autres

temps, l'évaporation n'est pas d'un demi-pouce : quand il fait froid, elle n'est que de quelques lignes seulement, ou ne paraît pas sensible (...). On peut donc croire que, de toutes les mers qui vont entre les tropiques, il s'élève par jour au moins un demi-pouce d'eau et probablement plus. Peut-être ne s'en détache-t-il pas la valeur d'une ligne vers les pôles : mais compensons le fort par le faible, nous ne risquons pas d'accorder qu'il s'évapore un quart de pouce d'eau d'un bout de la mer à l'autre. Il s'en élèvera donc en un an une lame d'eau épaisse de 365 quarts de pouces : le compte sera plus commode à 360 quarts, qui valent 180 demi-pouces : ce sont 90 pouces qui monteront de la mer en un an. Des 20 qui s'en détachent pour arroser nos terres, nous avons vu qu'il n'en rentre pas 10 dans la mer par l'embouchure de nos rivières. Les 10 autres, après avoir abreuvé les animaux et les plantes, s'écoulent en partie par-dessous terre et vont en partie, par l'évaporation, rejoindre la masse commune des vapeurs qui demeurent toujours composée au moins de 80 pouces. Il pleut autant sur la mer que sur la terre. Ce sont donc encore 20 pouces que nous pouvons retirer du total, mais ce total sera encore de 60 pouces. Que deviendra cette épouvantable masse d'eau et comment la mer réparera-t-elle la perte qu'elle en a faite ? La difficulté serait encore incomparablement plus grande, si après une évaporation qui la dépouille d'un si énorme volume d'eau, elle était obligée de livrer aux fleuves et aux fontaines, par des canaux souterrains, leur entretien ordinaire : pour le coup, elle serait bientôt à sec.

Que devient donc le surplus des nuées évaporées ?

Le Chev. De grâce n'appauvrissons plus la mer. Je suis assez en peine de savoir comment nous lui restituons ce qu'elle a perdu par la simple évaporation, puisque les pluies communes ne lui rendent pas le tiers.

Le Pr. Les deux autres tiers sont mis en réserve pour les besoins de la Zone Torride. Dans les révolutions successives que fait le soleil d'un tropique à l'autre, il brûlerait les peuples sur lesquels il darde à plomb ses rayons, si la Providence n'avait préparé un grand voile qui vient à propos se jeter entre le soleil et ces peuples, en sorte que la saison où ils sembleraient devoir périr sous cet astre brûlant devient réellement leur hiver, où le temps le plus froid qu'ils éprouvent durant l'année. A mesure que le soleil approche du tropique du Cancer et s'avance vers les climats septentrionaux, des vents du Nord qui semblent se tenir prêts pour partir alors comme à un signal donné, poussent devant eux la masse des vapeurs raréfiées et la font tomber sur l'entrée de la Zone Torride : ils épaississent cette masse et elle s'accroche par le pied aux montagnes d'Abyssinie et aux autres qu'elle rencontre, soit dans l'Inde, soit ailleurs. Elle s'y résout en pluie et ne cesse d'y verser une eau très abondante pendant plusieurs mois de suite. Les eaux roulent des montagnes dans les lieux bas et se rassemblent dans le lit des grands fleuves qui traversent les plaines. C'est ainsi que l'Inde, le Gange, le Niger et le Nil se remplissent, s'enflent et inondent les campagnes où ils se répandent comme des mers. Les habitants des pays

qui sont situés plus bas que ceux où se fait la chute des pluies, n'en voient souvent pas tomber une goutte chez eux pendant des années entières. Quel sujet d'admiration pour eux, de voir durant les ardeurs de la canicule, leur rivière s'enfler, les eaux s'élever sur leur campagne et y laisser en les quittant un limon qui répand la graisse et la fertilité. De même, quand le soleil s'avance par delà l'équateur vers le tropique du capricorne, d'autres vents soufflent des terres australes vers l'équateur, et viennent au secours des habitants de Guinée, du Monomopata, du Congo, du Brésil, du Pérou et du cœur de l'Amérique. Ils y versent l'eau par torrents plutôt que par gouttes. Ils emplissent les réservoirs innombrables qui doivent, le reste de l'année, nourrir le cours du Zaïre, des rivières d'Orénoque, des Amazones et de la Plata. Voilà les grands fleuves qui par leur bouche immense vont rendre à la mer ce qu'elle avait perdu par l'évaporation. Si vous craignez que les longues pluies qui tombent à flots sur les terres de la Zone Torride ne soient suffisantes pour reporter à la mer la valeur d'une lame de 60 pouces prise sur l'étendue de la surface, vous pouvez remarquer que les pluies ne sont pas moins abondantes sur les parties de la mer qui sont placées perpendiculairement sous le soleil, qu'elles le sont sur les terres que le soleil regarde à plomb, et on ne doit pas trouver étrange ce que j'ose avancer, que les pluies de la Zone Torride y jettent 60 ou 80 pouces d'eau, et peut être beaucoup plus, puisqu'en Italie, à Pise, à plusieurs endroits d'Angleterre, l'eau de pluie parvient à la hauteur de 40 ou 43 pouces. 60 pouces de pluies extraordinaires rendues à la mer dans la Torride seule, et 30 pouces de pluie communes dans la Torride et dans les tempérées, la mer n'a rien perdu. C'est toute l'évaporation (...).

L'infiltration

Je vous ai promis de vous montrer comment les vapeurs et les pluies s'insinuent dans les entrailles de la terre et y forment les fontaines. Divers éboulements de terre et de grandes ravines causées par des torrents impétueux ont dégarni, en divers endroits, les côtes de cette montagne (...). Il suffit pour mon objet de vous faire remarquer que toutes les parties dont la terre est composée, en quelque endroit qu'on la creuse, ou sous les plaines, ou sous les montagnes, ne sont que de grandes feuilles de différents grains de terre appliquées les unes sous les autres. Il nous revient de cette structure des avantages sans nombre et que nous approfondirons quand il vous plaira. Bornons-nous aujourd'hui à remarquer dans cet ouvrage l'artifice merveilleux qui procure aux plantes, aux animaux et au genre humain, une liqueur toujours prête à les rafraîchir au besoin, en recueillant ce qui s'y rassemble par la chute des vapeurs et par l'insinuation des pluies.

Le Chev. Quel rapport je vous prie peuvent avoir ces couches avec les vapeurs qui forment les pluies ? Hier après notre retour de promenade, il fit une pluie des plus fortes qui dura plus d'une heure. La pensée me vint d'examiner jusqu'où l'eau de pluie pénétrait la terre, et d'y découvrir si possible, comment elle s'y rassemble pour former des puits et des fontaines. Je

pris une bêche et j'ouvris la terre en six endroits tous différents, tant dans les jardins que dans les dehors du château. Je l'ouvris même sur une petite hauteur voisine pour voir si les terrains élevés boivent mieux l'eau que les terrains bas. En quelques endroits, je trouvai la terre trempée d'un demi-pied au plus, presque partout elle l'était beaucoup moins. Si les eaux des plus grandes pluies ne pénètrent la terre que de quelques doigts, il faut croire qu'elles vont se rendre dans les ruisseaux et de là dans les rivières qui les déchargent dans la mer. Mais je ne vois pas qu'elles puissent former la moindre fontaine, puisque la terre ne leur livre point passage.

Le Pr. La terre ne livre pas partout des passages libres aux eaux de pluies, mais elle leur est ouverte en bien des endroits et cela nous suffit. Je veux bien que la chose nous paraisse impossible, elle n'en est pas moins certaine (...). Au pied des montagnes toujours couvertes de neige, comme sont les Alpes et les Pyrénées, on trouve des fontaines qui commencent à couler en mai et qui tarissent en septembre (...). Dès que le soleil perd sa force en s'éloignant, les neiges cessent de fondre et les fontaines de couler. Plusieurs même ne coulent que durant la grande chaleur du jour : il est donc certain que l'eau des neiges fondues est le principe de ces fontaines et que l'eau coule bien avant au travers des terres, quoiqu'on ne voie pas les passages par où elle s'y insinue. Un autre fait est aussi certain, et qui est sous nos yeux, c'est que nos fontaines et nos puits s'affaiblissent ou tarissent entièrement dans les longues sécheresses et que le retour des pluies en ranime une partie et fait renaître l'autre. Il faut donc que les eaux de pluie trouvent des passages pour y parvenir (...). L'insinuation des pluies dans les terres est donc certaine. Mais essayons de voir comment elle se fait :

1°, on se plaint, dans les chaleurs, que les taupes, les vers, les mulots, les grillons et une multitude de petits insectes désolent la campagne et criblent la terre d'une infinité de conduits plus ou moins profonds. Le tort qu'ils nous font est amplement réparé par les ouvertures innombrables qu'ils préparent à la pluie qu'on attend : ils nous sont donc rien moins qu'inutiles.

2°, le dehors des terres se gerce et s'entrouvre dans les chaleurs, ce qui facilite aux eaux l'accès des couches inférieures ;

3°, c'est partout que l'on trouve sous terre de petites crevasses vides, des ravines plus ou moins larges, des méandres ou des passages tortueux, qui, comme autant de puisards, reçoivent les eaux qui coulent à la surface et les conduisent plus bas ;

4°, il y a des terres plus poreuses que d'autres et qui s'humectant abondamment des eaux qu'elles reçoivent, en font un amas qui se déchargera par un courant perpétuel dans un vallon fort éloigné. Il y a des rapports et des correspondances si bien ménagées entre les différentes parties de la nature, que celles qui paraissent les plus désunies, sont quelquefois celles qui s'entraident le mieux.

*Écoulement dans le sol
et le sous-sol, résurgence*

5°, enfin, il ne faut pas juger de la surface des montagnes par celle des plaines. Celles-ci sont assez criblées pour recevoir les eaux qui forment ces puits qu'on est maître de se donner presque partout. Mais c'est tout autre chose encore dans les montagnes. Les hauteurs en sont remplies d'inégalités, de cavités, de bassins exposés à l'air, de grottes souterraines, de terrains entrouverts et disloqués, si cela peut se dire (...). Les lits d'arènes laissent aisément entrer les pluies, et elles y descendent jusqu'à ce qu'elles trouvent une couche de matière plus serrée, comme l'argile et la pierre : et c'est sur cette couche qu'elles s'arrêtent. Elles percent au travers des arènes jusqu'à l'extrémité du lit de pierre ou de terre forte, et elles y trouvent ou y pratiquent par la force de leur poids, une issue pour s'échapper à l'air. Selon que le corps d'arènes est plus ou moins profond, ou que la couche dure est courbée en forme de bassin pour contenir peu ou beaucoup d'eau, la fontaine qui en provient est intermittente ou perpétuelle. Les eaux qui s'écoulent du bas de ces bassins ne s'élancent pas communément comme la liqueur qui s'échappe du bas d'un tonneau (...). L'eau qui s'accumule dans les immenses réceptacles des arènes que Dieu a mis au cœur des montagnes, ne pèse point ou ne pèse que fort peu sur la couche de terre forte qui l'arrête vers le bas. Une particule d'eau n'y pèse pas fortement sur une autre, elles ne font presque point corps : elles sont plutôt désunies et soutenues chacune par les arènes qui les avoisinent. D'où il arrive que l'eau qui touche à l'ouverture extérieure, se détache tranquillement des arènes qui la contenaient, sans être poussée rudement par l'eau qui était plus loin. Celle-ci sentant la place inférieure libre, y est portée par son poids avec une égale tranquillité. Chaque grain d'arène est un obstacle qui rend la chute moins rapide. Toute la masse d'eau s'abaisse ainsi paisiblement et s'écoule avec une lenteur extrême. Ce mécanisme n'est pas sans dessein. Il empêche qu'une dissipation trop prompte n'enlève aux habitants du voisinage la provision d'eau nécessaire, avant le retour des pluies. Commencez-vous, mon cher Chevalier, à comprendre la destination des couches d'arènes et de terre forte dont les montagnes sont composées.

Le Chev. Monsieur, je vois que nous regardons souvent comme inutiles et quelquefois comme fâcheuses les choses qui nous servent le mieux. La mer avec tous les sels est réellement ce qui sert à éteindre notre soif. Le vent dont nous nous plaignons tant est ce qui nous apporte les vapeurs de la mer. Les pointes des montagnes que nous trouvons inutiles servent à les fixer. Les trous, les inégalités, les crevasses qui rendent le terrain si affreux servent à introduire les eaux dans les entrailles des montagnes. Les couches de matières dures servent à les arrêter. Mais rien ne me ravit comme l'intelligence que je vois dans ces corps d'arènes qui ont été mis exprès au cœur des réservoirs pour ne pas laisser passer trop d'eau à la fois. Ils nous la distribuent avec économie.

Le Pr. Ce bel arrangement n'est point une imagination comme les filtrations et les alambics souterrains (...).

Le Chev. Je commence à soupçonner qu'il pourrait bien y avoir autant d'eau sous terre qu'il en coule dessus. La pluie qui tombe dans les plaines doit y en amasser beaucoup. Il n'y a pas toujours des lits d'argile dans les montagnes pour arrêter l'eau : elle descend alors plus bas. Ces eaux amassées sous terre ne s'évaporent point comme elles le font à l'air. Elles devraient donc regorger enfin et nous inonder. Que deviennent-elles ?

Le Pr. Cette objection va tourner en preuves de tout ce que nous avons dit de l'origine des fontaines. Des eaux de pluies qui pénètrent le fond des montagnes et des plaines, il se forme sous terre des courants d'eau qui vont se rendre à la mer bien au dessous de son niveau. Si je vous prouve la vérité de ces courants, j'aurai, ce me semble, levé votre difficulté.

Le Chev. Il ne me restera point le moindre doute de la vérité de votre sentiment.

Le Pr. L'existence des courants souterrains est attestée par une infinité de relations et par tous ceux qui ont travaillé aux mines (...). Que les eaux qui coulent sous terre proviennent de l'air et non de la mer, il est aisé de vous en convaincre. Des ouvriers anglais fort entendus dans le travail des mines, ont remarqué que partout où l'on trouvait de l'eau sous terre, on y avait aussi de l'air ; que quand l'eau manquait, on ne trouvait plus d'air à respirer, et que les lampes s'éteignaient. Ce qui prouve que les mêmes ouvertures qui ont servi à introduire de l'eau sous terre, ont aussi servi à y introduire l'air avec une égale liberté. Cette eau vient donc des dehors de la terre et non de la mer. Les mêmes ouvriers rapportent que dans plusieurs mines ils ressentaient bien avant sous terre l'odeur agréable de la fleur de trèfle³. Cela provient visiblement de ce que les eaux ont lavé les montagnes et baigné les prairies dans le temps des fleurs, coulent ensuite sous terre par des ravines et entraînent avec elles l'esprit des herbes odoriférantes qu'elles ont touché. Ces eaux prennent donc leur cours des terres vers la mer et non de la mer vers les terres (...).

Conclusion

Le Chev. Il y a donc une perpétuelle circulation d'eau entre la mer et la terre. L'eau de mer s'élève en vapeurs et se résout en neige et en pluie, ou sur les montagnes, ou sur les plaines. Celles qui tombent sur les montagnes y trouvent des bassins où elles s'épanchent doucement et se vont rendre à la mer par les dehors de la terre, en arrosant les vallées et les plaines. Celles qui tombent sur les plaines et qui les pénètrent s'en vont par-dessous terre au rendez-vous commun de toutes les eaux (...).

Le Pr. Vous voyez en même temps une correspondance très réelle entre des choses qui vous paraissent n'en avoir aucune (...). Toutes les pièces qui composent le globe s'entraident mutuellement. De la Zone Torride, il se répand sur les tempérées une chaleur qui les rend fertiles, et des zones tempérées, il se répand dans la torride un rafraîchissement qui les rend habitables. Tout est lié. La terre entière est l'ouvrage simple d'une même intelligence, et le bien de l'homme en est visiblement la fin.

³ Le trèfle cité ici n'est pas le trèfle cultivé de nos jours. Les trèfles cités dans les ouvrages de l'époque font référence au trèfle bitumineux, au triolet des prés, ou encore au trèfle sauvage pour parler du lotier.

Commentaire

Les disciplines scientifiques ont souvent fait l'objet d'analyses historiques. C'est le cas de l'hydrologie, en particulier du cycle de l'eau dont l'histoire est abordée par quelques textes français (Dooge, 1959 ; L'hôte, 1990) et étrangers (Biswas, 1970 ; Unesco-WMO-IAHS, 1974). Il est beaucoup moins courant d'avoir accès aux textes d'origine, qui permettent d'apprécier directement comment se posaient les questions scientifiques de l'époque, quelles étaient les approches conceptuelles et expérimentales mises en œuvre pour y répondre (Perrault, 1674 ; Mariotte, 1686 ; Halley, 1687). En hydrologie, des initiatives ont été prises dans ce sens (CNFSH, 1996). Il reste cependant rare de disposer de textes de synthèse sur un domaine donné, comme c'est ici le cas, qui permette de mesurer globalement l'évolution, tant sur le plan des connaissances, que sur celui des raisonnements et des méthodologies. Dans ce commentaire, nous replacerons d'abord ce texte dans l'histoire du cycle de l'eau, puis nous aborderons une analyse de la démarche exposée par le texte, nous situant délibérément du point de vue de l'hydrologue.

Le texte et l'histoire du cycle de l'eau

Dès l'antiquité il existe une richesse et une diversité d'études sur le cycle de l'eau basées sur différentes hypothèses quant à l'origine des écoulements superficiels (cf. Dooge, 1959 ; L'hôte, 1990 ; Chow, 1964, 1988). La littérature grecque et romaine présente notamment trois grandes hypothèses qui recourent partiellement celles présentées ici dans ce texte : selon l'hypothèse de Platon (428-348 av. J.C.), l'eau de mer revient par l'intérieur de la terre, s'y rassemble en une grande masse d'eau qui parvient à la surface de la terre selon des oscillations liées à l'agitation terrestre ; selon l'hypothèse formulée par Aristote (384-322 av. J.C.), l'eau de mer après un dessalement dû à un parcours plus ou moins long sous terre, parvient à former les rivières, la chaleur au centre de la terre étant le moteur de l'ascension ; enfin, l'hypothèse maintenant confirmée mais d'ores et déjà exprimée par Anaxagore (500-428 av. J.C.) comme le rapporte Aristote et soutenue plus tard par Lucrèce (98-55 av. J.C.), selon laquelle il s'agit d'un cycle conditionné par les mécanismes de précipitation et d'évaporation, amplement décrits par certains auteurs. Les deux premières hypothèses sont fortement étayées dans l'antiquité par la mythologie (le Tartare, pour la première, le dieu du feu, pour la seconde). Néanmoins, même si des travaux ont été réalisés au cours du temps, notamment au cours des époques chrétiennes et médiévales sur des éléments du cycle de l'eau, ils n'ont guère apporté de preuves pour conforter ces hypothèses.

Il a fallu attendre la période de la Renaissance, période de retour au goût de la matière et des observations, pour avoir peu à peu la démonstration du cycle de l'eau. Différentes étapes apparaissent dans cette démonstration, à laquelle cinq personnalités ont joué un rôle important.

Dans une première période, Léonard de Vinci (1452-1519) entreprend à la fois des observations et propose des concepts. Expérimentalement, il procède à de nombreuses expériences relatives à la mesure de la vitesse de l'écoulement de l'eau dans la rivière et à l'estimation des débits. Conceptuellement, il explique la recharge des nappes, met en évidence le principe de continuité dans l'écoulement, l'importance de la pente. Cependant, la première conception moderne du cycle de l'eau vient plus tard. Elle est due à Bernard Palissy (1510-1590), huguenot de la région de Bordeaux. Autodidacte et fin observateur, Palissy voyage beaucoup en tant qu'arpenteur. Se fiant à ses observations, il réfute l'hypothèse d'Aristote et expose, dans son « Discours admirable de la nature des eaux et des fontaines, tant naturelles qu'artificielles » (1580), sa conviction selon laquelle les sources et les rivières ont comme origine la pluie, sans pouvoir cependant réfuter, par une démonstration quantifiée, les autres hypothèses. Il s'appuie principalement sur les relations entre les eaux souterraines et les rivières. Au cours de cette époque une hypothèse principale est donc avancée, des démarches expérimentales et conceptuelles sont ébauchées, permettant d'aller vers la démonstration quantifiée.

La période qui suit, celle du XVII^e siècle, est celle de la démonstration des mesures, grâce à des observations, et à une instrumentation qui se développe peu à peu. Des éléments quantifiés du cycle de l'eau apparaissent pour réellement trancher entre ces hypothèses, grâce notamment à Pierre Perrault (1611-1680), Edmée Mariotte (1620-1684) puis Edmund Halley (1656-1742). Ceux-ci parviennent pas à pas à quantifier les éléments du cycle de l'eau sur de grands bassins versants, celui de la Seine notamment, par des mesures des précipitations, de l'évaporation et des débits. Pierre Perrault, juriste et physicien amateur, réalise les premières mesures des éléments du cycle hydrologique. Dans son ouvrage, intitulé *De l'origine des fontaines*, il expose les premières estimations du bilan de la Seine à Aignay-le-Duc (Côte-d'Or). Ce bilan de la Seine est réalisé ensuite à Paris par Mariotte et publié dans le *Traité des eaux et des corps fluides* (1686). C'est un bilan plus affiné sur la base de mesures plus exhaustives et plus précises. Tous deux ont contribué à démontrer la partie du cycle de l'eau se rapportant à la pluie et à l'écoulement superficiel : ils ont établi que l'écoulement équivaut à moins d'un sixième des précipitations. En s'appuyant sur le cas des grandes rivières, ils démontrent ainsi que l'abondance des précipitations observées suffit pour générer l'écoulement observé. Ils en déduisent que le surplus s'infiltré dans le sol et alimente les nappes souterraines, ou s'évapore, ou est absorbé par les végétaux. C'est ce raisonnement et les données de Mariotte qui sont strictement et fidèlement reprises dans le texte de Pluche présenté ici.

La contribution de Halley, astronome anglais, a porté sur la partie complémentaire du cycle de l'eau, à savoir l'importance de l'évaporation pour expliquer les précipitations et l'écoulement. Celui-ci a démontré que les quantités évaporées observées, en particulier l'évaporation marine, pouvaient être suffisantes pour justi-

fier les quantités de précipitations et d'écoulements observés. À l'opposé des contributions de Perrault et Mariotte, celle de Halley, pourtant antérieure au texte présenté, n'y figure pas de façon aussi explicite : les valeurs citées sur l'évaporation marine dans le texte sont en effet deux fois plus grandes que celles fournies par Halley. Halley a tenté également de faire des bilans sur de plus grands domaines que les rivières. Il a en particulier réalisé un bilan bien connu sur la Méditerranée. Ce bilan, non cité également dans ce texte, apparaît tout aussi imprécis que celui donné par le texte présenté ici sur le bilan hydrique mondial.

La période suivante, correspondant grossièrement au XVIII^e siècle, est celle du grand développement de l'instrumentation, sur la base de mesures manuelles, puis automatiques, des pluies et des débits. Cette époque est aussi celle des premières lois physiques. Ces avancées pourtant pour partie contemporaines de la publication du texte ne sont pas non plus évoquées ici. La formalisation générale des équations du bilan hydrologique, exprimant l'écoulement comme la différence entre les précipitations et l'évaporation n'apparaîtra que plus tard, grâce à la contribution de John Dalton (1766-1844). Celui-ci fera notamment le bilan hydrologique de l'Angleterre et du Pays de Galles.

En conclusion, on peut dire que ce texte retrace les travaux majeurs en hydrologie des deux siècles qui ont marqué la découverte du cycle de l'eau. Il ramasse dans un premier temps les différentes hypothèses, les mettant a priori sur le même plan. Ce point de départ correspond approximativement à l'état des connaissances au début XVI^e siècle. Il reprend la démonstration de Palissy, les mesures de Perrault et de Mariotte qui ont permis d'établir les principaux mécanismes impliqués dans le cycle de l'eau. Il porte ainsi la marque de l'état des connaissances à la fin XVII^e siècle.

Le texte et l'hydrologie d'aujourd'hui

Une confrontation très succincte entre les connaissances présentées dans le texte et celles d'aujourd'hui peut être faite sous trois angles. Tout d'abord on se

demandera quelle est la pertinence des connaissances exposées dans ce texte par rapport à celles d'aujourd'hui. On commentera ensuite la démarche scientifique du point de vue de la méthode. On dira enfin quelques mots sur le poids du contexte de l'époque sur cette présentation du cycle de l'eau.

Pertinence des connaissances.

Dans ce texte, la connaissance du cycle de l'eau repose sur des mesures peu nombreuses et très imprécises. Ces mesures ont été réalisées sur un cas que l'on peut considérer comme simple, celui du bassin versant de la Seine, rivière relativement régulière et bassin versant dont le domaine est relativement bien connu. Malgré la grande faiblesse des données et la simplicité des concepts, un bilan annuel à l'échelle d'un grand bassin versant tel que celui de la Seine a pu être réalisé de façon très approximative. Chacun des termes du bilan de l'eau est cependant mal estimé, les erreurs se compensant par un heureux hasard : les précipitations annuelles sont sous-estimées, les surfaces légèrement surestimées, le débit moyen annuel résultant légèrement sous-estimé par rapport aux données actuelles (Tableau I).

L'écoulement, établi à un sixième des précipitations à cette époque, est en fait plutôt de l'ordre du quart. Cependant la démonstration d'une partie du cycle de l'eau est établie, en démontrant que la quantité de pluie tombée sur un bassin versant suffit pour expliquer l'écoulement, puis que l'évaporation suffit pour expliquer la pluie. En définitive, malgré la faiblesse de mesures limitées à un cas d'étude, la démonstration qualitative des mécanismes impliqués dans le cycle de l'eau a été réalisée principalement grâce à une capacité de synthèse et de simplification des auteurs qui ont su mobiliser les observations essentielles et des raisonnements simples basés sur des bilans comparatifs d'entrée et de sortie. La démonstration des grands mécanismes impliqués dans le cycle de l'eau est en définitive exacte et très clairement exprimée.

Deux échelles, le grand fleuve et la planète, sont privilégiées dans ce texte et le restent actuellement. Ce sont par exemple les approches de bilans hydrogéochimiques à l'échelle des grands fleuves ou les bilans planétaires, en relation notamment avec des problématiques de changements globaux. Par contre l'étude des mécanismes élémentaires en hydrologie, correspondant, à l'échelle du profil de sol, à celle du bassin versant élémentaire, est encore très loin des préoccupations de l'époque, peut-être parce qu'elle apparaît trop comme une échelle de grande hétérogénéité, de faible représentativité, à laquelle il est difficile d'intégrer les données et à partir de laquelle il est difficile d'extrapoler.

On voit également qu'il est plus facile de tenir des raisonnements sur l'espace que sur le temps. Une intégration grossière sur différentes échelles d'espace est proposée même si cet espace est très mal défini, comme c'est le cas de l'échelle planétaire à cette époque (Tableau II). Le bilan proposé à cette échelle de la terre est très éloigné des connaissances d'aujourd'hui.

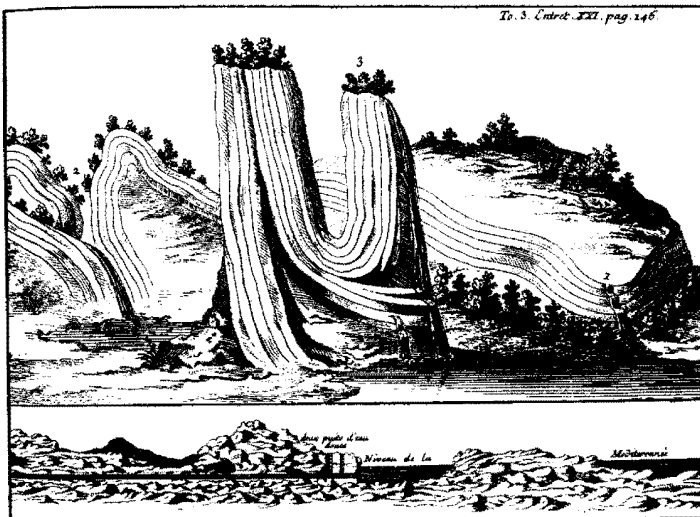


Figure 1. Rivière souterraine qui entre sous la méditerranée proche de Frontignan.

Tableau 1. Comparaison du bilan hydrique annuel de la Seine à Paris, à partir des données fournies dans le texte de Pluche et des données actuelles (Source Banque Hydro). Comparaison des flux en entrée (pluie, surface du bassin versant) et en sortie (débit). Le bilan Flux sortant/Flux Entrant n'est pas très différent (0,15 contre 0,27), des erreurs notables sur chacun des termes du bilan se compensant. Il montre que les précipitations suffisent pour expliquer l'écoulement.

	<i>Pluche (1)</i>		<i>Données actuelles (2)</i>	<i>Ratio (1)/(2)</i>
	<i>Unités citées</i>	<i>Unités actuelles</i>		
Cumul annuel des pluies, P	20 pouces minorées à 15	540 mm 405 mm	750 mm	0,72 0,54
Surface du bassin versant, S	60 x 50 lieues	59 972 km [≈]	43 800 km [≈]	1,37
Flux entrant (P x S)	714, 15. 10 ⁹ pied ³	24,28 10 ⁹ m ³	32,85. 10 ⁹ m ³	0,74
Section, Se	400 x 5 pied ≈	210 m [≈]		
Vitesse de l'eau, V	100 pieds/mn	32,4 m/mn		
Flux sortant (Se x V x temps)	288. 10 ⁶ pied ³ /jour 105,12. 10 ⁹ pied ³ /an 113,4 m ³ /s	9,79. 10 ⁶ m ³ /jour 3,57. 10 ⁹ m ³ /an 281 m ³ /s	8,86. 10 ⁹ m ³ /an	0,4
Flux sortant/ Flux Entrant		0,15	0,27	

Conversions utilisées : 1 pied = 32,4 cm ; 1 pied = 12 pouces ; 1 pied³ = 34,01 dm³ ; 1 toise = 6 pieds ; 1 lieue = 2300 toises.

d'hui. La géographie est très mal connue hors du continent européen. On ne connaît pas la surface relative des terres et des mers. Très généralement, peu de raisonnements sont tentés dans ce texte sur le temps, en terme de datation ou de cinétique, ou si certains le sont, c'est sur des bases encore très éloignées des connaissances actuelles. Les couches de sels sont datées du déluge, l'âge de la terre est évalué à 10 000 ans, l'âge des « flueurs » est tout à fait indéterminé. Évidemment nous n'en sommes plus là, mais l'appréhension du temps en hydrologie reste aujourd'hui plus difficile que celle de l'espace. Par exemple, la connaissance des temps de résidence de l'eau, des temps d'acquisition de la qualité des eaux en interaction avec les milieux traversés, constitue une grande question d'actualité qui passe par une connaissance préalable de l'espace et de l'identification des structures spatiales majeures.

Ce texte montre aussi que les avancées en hydrologie ont été considérables depuis : beaucoup de connaissances fondamentales manquent encore. C'est le cas par exemple du concept simple de capillarité dans un milieu poreux. Le texte suppose par exemple que l'eau monte dans le sable ou dans le sucre sous l'effet de la pression atmosphérique, l'air trop grossier circulant mal dans ces milieux... Plus finement, aucun des formalismes exprimant le transfert de l'eau, par opposition au bilan de l'eau, n'existe encore. Les grandes lois physiques de l'écoulement ne sont pas connues. Le vocabulaire est celui du langage courant et comporte une faible technicité. Globalement, les avancées réalisées depuis cette époque ont donc été importantes. Des mécanismes hydrologiques d'une plus grande complexité ont été mis en évidence et formalisés. Ces mécanismes et ces lois ont pu être distribués sur de larges gammes d'échelles d'espace et de temps, sur une grande diversité de systèmes hydrologiques. Ces avancées sont d'autant plus remar-

quables que le laps de temps écoulé depuis les travaux exposés est finalement assez court : il correspond approximativement à huit générations, ou encore à six carrières de chercheur mises bout à bout.

Méthode et connaissance

Le souci d'asseoir la connaissance sur des observations et des mesures est fortement présent dans le texte. Cette méthodologie d'observation et de mesure comporte ici le souci d'examiner la qualité de la mesure, la variabilité des paramètres et leur incidence sur le modèle sous-jacent, qui est ici un modèle de bilan. Les techniques de mesure sont relativement bien détaillées, même dans ce texte court, que ce soit pour la mesure de la pluie, de l'évaporation, de l'évapotranspiration ou celle du débit. La gamme des mesures, entre minima et maxima, est abordée, que ce soit dans le temps – variations des débits au cours de l'année, par exemple – ou dans l'espace – variations des précipitations à l'échelle de l'Europe, par exemple. On trouve très présent le souci de prendre en compte différentes échelles d'espace et de temps, d'examiner l'importance relative des termes du bilan hydrologique en fonction de différentes échelles de temps et d'espace. Dans l'espace, on insiste sur la complexité des différents chemins de l'eau pour des échelles imbriquées, du pore, du trou de ver de terre ou du milieu poreux en général, jusqu'à la caverne, aux mines ou aux ravines. Le bilan est réalisé à deux échelles d'espace, le grand fleuve, ici la Seine, puis à l'échelle planétaire en incluant l'hétérogénéité entre la zone tempérée et la zone tropicale. Sur le bassin versant de la Seine, des résolutions temporelles de l'ordre de la journée sont intégrées à l'échelle de l'année, voire sur quelques années. L'esquisse réalisée vers un bilan mondial, très risquée au regard de la méconnaissance de la surface terrestre, est tentée.

L'incertitude des termes du bilan de l'eau induite par le choix de valeurs arbitraires est discutée. La méthodologie est donc mise en avant tout au long du texte : elle apparaît comme la clé de la démonstration. C'est la modernité du texte sur le plan de la méthodologie.

On trouve également une certaine modernité dans le texte, par des similitudes dans le questionnement, avec, bien sûr, des échelles et des mécanismes d'un ordre de grandeur très différent. Ainsi l'introduction pose d'emblée la question des *chemins de l'eau* et des *mécanismes*, termes qui gardent une grande actualité en hydrologie. Les réponses données au xvii^e et xviii^e siècles à ces questions sont, comme on l'a dit, surtout basées sur des observations in situ et des mesures. Elles s'appuient sur des raisonnements simples et intuitifs basés sur le cheminement de l'eau. Elles visent à établir les termes du bilan de l'eau, voire des sels. Des raisonnements de type traçage des chemins de l'eau, par le sel ou l'odeur des trèfles sont également mis à contribution pour la démonstration. Ces démarches de bilan et de traçage constituent encore des éléments essentiels de tout raisonnement en hydrologie, en prenant cependant en compte une grande diversité de mécanismes hydrologiques et géochimiques.

À l'opposé, la méthodologie a fortement évolué du fait principalement d'une complexification des formalismes et d'une évolution technologique, qui se sont développées très progressivement par la suite et qui ont récemment explosé du fait de la multiplicité des capteurs, de la puissance des capacités de stockage des données de terrain et des calculateurs. Les

techniques de mesure ont ainsi été complètement renouvelées. Les approches par modélisation se sont considérablement développées, les formalismes affinés. Une plus grande diversité d'informations est recherchée, pour analyser des processus plus complexes qui s'expriment selon différentes échelles d'espace et de temps. En définitive, les mesures et les modèles de bilans décrits dans ce texte pourraient être comparables à ceux que l'on fait de nos jours sur certains éléments chimiques et à certaines échelles, soit parce que l'on dispose encore de peu de données, soit parce que les processus qui régissent leur devenir au cours du cycle hydrologique (réactivité vis-à-vis de la matière, spéciation chimique...) sont encore largement inconnus.

Ce texte constitue ainsi une illustration remarquable d'une certaine démarche scientifique, allant de l'observation à l'identification de processus, même si les connaissances en jeu font date. Des raisonnements déductifs sont appliqués imparablement, de façon simple et claire. Ce texte présente ainsi un double caractère didactique, pour son objet, le cycle de l'eau, et plus généralement, pour l'illustration qu'il nous donne d'une méthodologie rigoureuse, basée sur la simplicité et la synthèse, sur l'observation et la mise en œuvre du principe de causalité.

Le poids du contexte de l'époque

Le poids du contexte social et culturel apparaît très fortement dans ce texte et dans l'interprétation des

Tableau II. Comparaison du bilan de la terre, à partir de données fournies dans le texte de Pluche et des données actuelles (Source Référence World Resources 1990-1991, in : Marsily, 1995). Comparaison du bilan des océans (pluie, évaporation, flux de la terre à la mer), en prenant ou non en compte des flux différents selon les zones climatiques. Les erreurs sur chacun des termes sont importantes. On montre que l'importance de l'évaporation en mer devrait suffire pour expliquer les précipitations. Le bilan n'apparaît bouclé qu'en faisant intervenir des flux très différents en zone tempérée et en zone tropicale.

	Pluche (1)		Données actuelles (2)	Ratio (1)/(2)	
	Unités citées	Unités actuelles			
Pluie					
Cumul annuel sur la mer, Pm	20 pouces	540 mm	385 000 km ³ /an	1120 mm	0,48
Cumul annuel sur terre, Pt	18 à 20 pouces	486 à 540 mm	111 000 km ³ /an	720 mm	0,75
Surface de la mer, Sm			361 300 000 km ²		
Surface des terres, St			148 800 000 km ²		
ratio St/Sm		1		0,41	2,44
Évaporation					
Flux journalier mer	0,25 pouces/jour	6,75 mm/j			
Cumul annuel sur la mer, Em	90 pouces	2430 mm	425 000 km ³	1250 mm	1,94
Cumul annuel sur les terres, Et	—	—	71 000 km ³ /an	590 mm	—
Flux de la terre à la mer, F1	10 pouces	270 mm	40 000 km ³ /an		1,17
1^{er} bilan de la mer	Dm = Em - Pm - F ₁ = 90 - 10 - 20 = 60		Em - Pm - F ₁ = 0		
En prenant en compte les spécificités de la « Zone Torride »					
Cumul annuel de pluie	40 pouces	1080			
Flux de la terre à la mer, F2	50 pouces	1350			
2^e bilan mer	Em - F ₁ - F ₂ - P moy = 90 - 10 - 50 - 30 = 0				

Conversions utilisées 1 pied = 12 pouces 1 pied = 32,4 cm

connaissances. Ce texte doit en effet être replacé à la fois dans le contexte de la démarche scientifique pratiquée au XVIII^e siècle, qui privilégie l'observation, et dans le contexte du mouvement physico-théologique de l'époque qui recherche dans les phénomènes naturels une expression divine. Les auteurs de l'époque éprouvaient un véritable bonheur dans l'étude des phénomènes naturels. La conclusion de ce texte illustre bien. Ils cherchaient l'harmonie universelle : liaison et entraide entre différents domaines, celui de la montagne et de la plaine au sein du bassin versant, celui de la zone tempérée et de la zone tropicale à l'échelle du globe. Ils l'interprétaient comme la marque divine, ayant pour finalité le bien de l'homme. On ne peut que souligner l'enthousiasme de cette époque, enthousiasme soulevé par différents éléments : l'importance donnée à l'observation, au contact direct à la nature ; l'idée de découverte et l'afflux de connaissances nouvelles ; la compréhension et l'explication des fonctionnements globaux, en relation avec l'idée d'harmonie divine et universelle ; enfin, la certitude d'un modèle global orienté vers le bonheur de l'homme. Cet enthousiasme guidait l'enseignement des connaissances et le développement des travaux de recherche. Ces éléments n'ont plus à l'évidence la même importance. Il n'y a par ailleurs pas dans cet extrait sur le cycle de l'eau de référence d'ordre économique, mis à part pour le sel où l'on évoque les possibilités d'épuisement de la ressource.

Quels éléments sont par ailleurs susceptibles de soulever actuellement pareil enthousiasme ? Les travaux actuels en hydrologie se positionnent la plupart du temps dans un contexte de déséquilibre ou de rationalisation de l'utilisation des ressources. La recherche d'une optimisation de la gestion des ressources non renouvelables, dans le cadre d'un développement durable, est mise en avant, alliant des préoccupations environnementales et économiques. C'est le problème de l'évaluation, de la gestion et de la

conservation des ressources qui est à l'ordre du jour, dans un contexte où les activités de l'homme exercent de fortes contraintes sur l'environnement. Ces préoccupations induisent des recherches orientées vers l'analyse des contraintes et des impacts sur la ressource, ainsi que vers l'élaboration de solutions alternatives ; ceci pèse sur les choix des orientations de recherche et sur les résultats et la dynamique des recherches.

Remerciements. – À Mamaine et à son époux Adrien Cart qui avait travaillé sur Pluche, pour nous avoir laissé des ouvrages pleins d'Histoire.

RÉFÉRENCES

- Biswas, A.K. 1970. *History of hydrology*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, London.
- Cap, P.A. 1844. *Œuvres complètes de Bernard Palissy*. J.J. Dubochet et Cie, Paris.
- Chow, V.T. 1964. *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T. 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Dooge, J.C.I. 1959. Un bilan hydrologique au XVII^e siècle. *La houille Blanche*, 6, 799-807.
- L'hôte, Y. 1990. Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe. *Hydrol. Continent.*, 5, 13-27.
- Mariotte, E. 1686. *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*. Éd. Michalet, Paris.
- Marsily, G. 1995. *L'eau*. Éd. Dominos-Flammarion, Paris.
- Perrault, P. 1674. *De l'origine des fontaines*. Traduction anglaise par A. Laroque, 1967. *On the origin of springs*. Hafner Publishing Co, New York, London.
- Pluche 1735. *Spectacle de la nature ou Entretiens sur les particularités de l'histoire naturelle, qui ont paru les plus propres à rendre les jeunes gens curieux et à leur former l'esprit*. Éd. Estienne & Fils, Paris.
- Unesco-WMO-IAHS 1974. *Trois siècles d'hydrologie scientifique*. Rapports de base présentés à l'occasion de la célébration du Tricentenaire de l'hydrologie scientifique, Paris.