

Glossaires

- la **source** qui représente le point d'origine du cours d'eau
- l'**amont** (la partie la plus élevée du cours d'eau topographiquement) en opposition à l'**aval** (la partie la moins élevée)
- le **lit mineur** c'est-à-dire l'espace qui est occupé de manière permanente ou temporaire par le cours d'eau
- le **lit majeur** qui est occupé temporairement en période de crue lors des inondations
- la **rive** qui borde le cours d'eau
- les **berges** qui délimitent le lit mineur maintenues par la végétation (les saules, aulnes...)
- les **annexes hydrauliques**, qui peuvent être définies comme une forme topographique quelconque, remplie plus ou moins d'eau et fréquemment coupée du lit majeur du fleuve durant la période d'étiage
- la **ripisylve**, qui correspond à la végétation de bords de cours d'eau ; elle est composée de plusieurs strates : herbacée, arbustive, arborée
- l'**embouchure** ou estuaire qui est le lieu où le cours d'eau (fleuve) termine sa course (généralement dans un océan, dans la mer ou dans un lac)

D'autres éléments secondaires permettent de caractériser un cours d'eau comme les **méandres** par exemple qui sont des sinuosités très prononcées du cours d'un fleuve ou d'une rivière.

L'ensemble des cours d'eau naturels et artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement forme le réseau hydrographique

Les différents types de cours d'eau

En fonction de ces caractéristiques mais également de la longueur, de la localisation géographique ou d'autres paramètres, différents types de cours d'eau peuvent être distingués tels que :

- le **ru** : petit cours d'eau, souvent en tête de bassin, démarrage de l'écoulement
- les **ruisseaux** : petits cours d'eau de faible largeur et de faible longueur,
- le **canal** : conduit naturel ou artificiel permettant le passage d'un fluide
- les **torrents** : cours d'eau situés généralement en montagne ou sur des terrains accidentés, au débit rapide et irrégulier,
- les **rivières** : cours d'eau moyennement importants dont l'écoulement est continu ou intermittent, elles se jettent dans d'autres rivières ou dans des fleuves,
- les **fleuves** : cours d'eau parfois importants se jetant dans l'océan ce qui les différencie des rivières.

Les différents facteurs influant sur la qualité des cours d'eau

La qualité des cours d'eau dépend de différents facteurs qui peuvent être modifiés et dégradés. Ils permettent de dresser un diagnostic du cours d'eau pour évaluer le besoin ou non d'aménagement.

Les principaux **facteurs physico-chimiques** déterminant l'état des cours d'eau sont les suivants :

- la température,
- le taux d'oxygène dissous

- le taux d'azote
- le taux de phosphore
- le taux de polluants
- le pH
- le taux de salinité
- la présence ou non de prolifération végétale
- le taux de matières en suspension...

Les **facteurs hydromorphologiques** représentent les facteurs morphologiques et dynamiques (évolution des profils en long et en travers). Sont alors étudiés :

- le lit mineur (diversification des écoulements, aménagement de l'habitat piscicole, sinuosité du cours d'eau, pente, granulométrie...)
- l'état des berges et des ripisylves
- le lit majeur et ses annexes (maillage bocager, reconnexion des annexes hydrauliques, bandes enherbées, restauration de zones humides...)
- la continuité écologique (migration des poissons) et la ligne d'eau : présence d'un obstacle à l'écoulement, reconquête des écoulements libres...
- le débit

Des **facteurs biologiques** sont également utilisés pour déterminer la qualité d'un cours d'eau. Les **facteurs écologiques essentiels** sont la vitesse du courant, la nature du fond, l'éclairement, la température, l'oxygénation et la composition chimique. Ces facteurs **varient en fonction de la zone du cours d'eau** (source, cours supérieur ou cours inférieur) et influent sur la **composition des peuplements animaux et végétaux** qui peuvent être très diversifiés.

A. Le problème croissant de la ressource en eau.

L'eau constitue l'un des enjeux majeurs des prochaines années. Conséquence ou non du changement climatique, le risque de pénurie d'eau est réel car les besoins ne cessent d'augmenter. En effet, les usages de plus en plus nombreux de l'eau, qui recourent aux prélèvements directs dans la rivière ou aux pompages dans les nappes souterraines, aggravent les situations de sécheresse. Le géographe Fernand Verger, souligne dans un numéro de l'Expansion consacré à la pénurie d'eau (2006) : « l'intensification agricole a rendu les fluctuations climatiques naturelles insupportables », montrant que dans le cas particulier de l'irrigation agricole, la marge de manœuvre est dramatiquement réduite.

La situation climatique exceptionnelle de l'été 2003, a rappelé le caractère possible des pénuries d'eau et montré la vulnérabilité de certaines activités humaines face au manque d'eau. Celle-ci est d'autant plus élevée qu'il s'agit de situations assez rares, auxquelles nos sociétés (européennes) ne sont pas habituées. Malgré le caractère exceptionnel de ces situations, la question de la ressource en eau n'a jamais été autant évoquée, au point d'en devenir un marronnier journalistique. Mais, face aux enjeux importants, le fait que ces situations de sécheresse exceptionnelle puissent devenir plus fréquentes doit bien être

envisagé, même si parler de pénurie d'eau peut paraître « décalé » en regard des abats pluviométriques dans ces régions.

L'accès à l'eau peut être source de graves conflits sur la planète. Comme le souligne d'ailleurs Giblin (2003), « l'origine même du mot « rivalités », d'après le dictionnaire historique de la langue française *Robert*, renvoie à l'eau puisque le premier sens de « rival » signifie ceux qui tirent leur eau du même cours d'eau (*rivus*, le cours d'eau) et qui s'opposent en de fréquents différends ». Les problèmes les plus graves concernent les pays en voie de développement pour lesquels l'accès à l'eau est encore un luxe. La consommation d'eau moyenne par jour varie de 150 litres pour un européen à moins de 20 litres pour un habitant d'Afrique subsaharienne. Une importante inégalité subsiste donc à l'échelle de la planète.

B. Terme Étiage

La langue française permet de discerner les termes « basses eaux » et « étiage ». En s'appuyant sur le Glossaire International d'Hydrologie (1992), on peut constater que cette distinction n'est pas opérée dans toutes les langues, comme l'attestent certaines traductions : « étiage » se traduit ainsi « niedrigwasser » en allemand, « acqua bassa » en italien ou encore « low water » en anglais. Pour ces exemples, l'étiage est exprimé à partir d'une association de mots dont la traduction littérale les rapproche fortement de « basses eaux » en français. Pour preuve, le Lexique Hydrologique pour l'Ingénieur (1996) propose de traduire « low water » par « étiage, basses eaux », sans distinction supplémentaire.

Il convient alors de souligner que malgré le recours à un terme spécifique pour désigner l'étiage en français, d'une part la définition de ce mot est complexe et parfois confuse, d'autre part la distinction entre étiage et basses eaux n'est pas toujours clairement établie. Dans ce contexte, il nous a paru important de faire le point sur les terminologies employées et sur les nombreuses définitions de l'étiage.

C. Définitions

. Qu'est-ce que l'étiage ?

Étymologiquement, étiage aurait été dérivé du mot « étier », terme qui désigne le canal qui amène l'eau de mer aux marais salants. Ce mot est attesté en 1780 (Dacharry, 1996). L'étiage correspondait à l'état d'un étier après le retrait des eaux. Une seconde étymologie, recensée dans le Littré (1872), indique que le mot « étiage » pourrait renvoyer au terme latin « aestas » (été) donnant ainsi : « le niveau de l'été pour une rivière ».

Des définitions parfois confuses

Les définitions du terme étiage sont parfois imprécises, notamment qu'il s'agisse d'une référence issue d'un dictionnaire spécifique d'hydrologie ou bien d'un ouvrage plus général. Certaines définitions laissent ainsi entendre que l'étiage se produit tous les ans : « niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné » (Dictionnaire français d'hydrologie de surface, Roche, 1986).

D'autres définitions suggèrent au contraire qu'il s'agit d'une situation plus exceptionnelle (« Abaissement exceptionnel du débit d'un cours d'eau. Le terme de « basses eaux » ou « maigres » désigne un abaissement plus normal et plus fréquent », Larousse Encyclopédique). D'autres encore, assez vagues et ne se référant à aucun contexte temporel, sont également relevées : par exemple la définition proposée dans le Glossaire International d'Hydrologie : « plus bas niveau atteint par un cours d'eau ou un lac ». Si l'expression « plus bas niveau » semble communément utilisée, on relève par exemple dans un dictionnaire de géographie la définition suivante de l'étiage : « période de basses eaux. Synonyme de maigre » (Dictionnaire simplifié de la géographie, Saffache, 2003). Pour cet exemple, l'étiage est assimilé à la période de basses eaux. Cet amalgame entre les termes « étiage » et « basses eaux » doit être évité.

D. Distinction entre étiage et basses eaux chez les auteurs géographes et définitions retenues

Afin d'éviter toute confusion, une distinction claire entre ces deux termes doit être faite. En ce sens la définition de l'étiage proposée par Dacharry (1996) nous satisfait particulièrement : « débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières, même s'il en est l'exacerbation ». Cette distinction est d'ailleurs généralement précisée par les hydrologues qui se sont intéressés aux étiages. Pardé (1963) parle ainsi d'étiage avec les termes de « maigres prononcés ». Frécaut (1967) insiste également sur la différence entre ces deux termes en soulignant que « les étiages ou maigres prononcés se différencient doublement des basses eaux ordinaires et annuelles ». Rochefort (1969) indique que les étiages représentent « une baisse de niveau plus considérable que celle qui caractérise les basses eaux moyennes ».

Enfin, on peut remarquer que les définitions de l'étiage font référence au phénomène, à l'état, mais elles n'apportent généralement pas de précision sur les processus impliqués. Dans ce contexte, la définition du Dictionnaire de la géographie (George et Verger, 2000) apparaît intéressante car l'étiage est désigné comme une « période pendant laquelle les débits sont très bas et peu variables parce que issus des seules nappes souterraines en voie d'épuisement, de

tarissement ». A ce titre, on peut souligner que la définition proposée par Dacharry dans le Dictionnaire français d'hydrologie (1996) est complétée par un commentaire dans lequel les processus de genèse et de tarissement sont spécifiés.

Le tarissement des cours d'eau constitue en effet le processus principal durant les étiages.

E. Autres aspects définissant l'étiage : variables statistiques, durée, saison

D'autres aspects peuvent être rattachés au phénomène de l'étiage car il ne se résume pas seulement à un faible débit. L'étiage peut être caractérisé par une durée, un volume, etc. Tous ces aspects ne sont pas nécessairement précisés dans la définition générale du terme dans la mesure où, dans la pratique, ces aspects sont clairement décrits par les nombreuses définitions statistiques de l'étiage. La principale difficulté réside dans le choix de la variable qui va permettre de caractériser au mieux cet événement. Il n'existe pas de variable qui rende compte de toute la complexité du phénomène à travers une seule valeur. En France, la variable recommandée par les textes de loi correspond au **QMNA** (débit moyen mensuel le plus bas de l'année). Un précédent travail a cependant montré que le **QMNA** n'est pas toujours représentatif d'une situation d'étiage (Lang, 2004). Le pas de **temps mensuel**, trop global, a tendance à effacer les variations journalières et pour certaines années, l'échelle de travail devrait être plus fine. De même, des événements originaux, notamment des étiages tardifs qui peuvent se prolonger sur plusieurs mois, ne sont pas pris en considération dans leur intégralité avec le QMNA qui borne la durée.

Par ailleurs, l'usage d'une variable telle que le QMNA impose un caractère annuel à l'étiage. Pourtant, l'idée que l'étiage ne se produit pas tous les ans peut constituer une approche intéressante. Il reste alors à définir quels événements doivent être retenus, en fixant des seuils en deçà desquels on estime qu'une valeur est « représentative » d'un débit d'étiage. Ces seuils sont délicats à définir ; la limite entre les basses eaux et l'étiage constitue, comme le souligne Frécaut (1975), « une limite encore plus malaisée à établir qu'entre hautes eaux et crue ».

La caractérisation des situations d'étiage, par le biais d'une variable unique, est notamment rendue difficile du fait de la variabilité de la durée et de la période d'apparition du phénomène.

Les étiages apparaissent généralement, sous nos climats, durant la période de basses eaux. Mais comme l'indique Frécaut (1975), il arrive que la période d'étiage se prolonge « au-delà de la saison « normale » de basses eaux jusqu'en octobre ou en novembre, en des mois tardifs où les moyennes des débits indiquent déjà une recrudescence de l'écoulement ». Une

situation d'étiage avec des bas débits sur une très longue période n'est-elle pas plus préjudiciable que des débits extrêmement bas mais sur une courte durée ? Un aspect fondamental de l'étiage est introduit ici : sa durée. Ce critère est souvent écarté des analyses statistiques classiques alors qu'il s'agit d'un facteur déterminant en terme d'impacts et de préjudices. Il nous semble donc important d'en tenir compte pour la caractérisation du phénomène.

« Un étiage peut être la conséquence d'une sécheresse hydrologique, mais à l'inverse de celle-ci, il n'est généralement pas considéré comme un événement exceptionnel » (Abi-Zeid et Bobée, 1999). Il est donc nécessaire de pouvoir caractériser la sévérité d'un étiage afin de définir les événements exceptionnels. Cette étape est généralement réalisée par le biais d'une analyse statistique qui permet d'attribuer à un étiage une durée de retour.

Mais les seuls résultats d'une analyse statistique ne suffisent pas à définir la sévérité d'une situation. Celle-ci est en effet dépendante des besoins humains qui semblent plus définir les niveaux de crise que la situation hydro-climatique elle-même. Pour preuve, des assecs éventuels sur de petits cours d'eau peu exploités importent moins que les niveaux des rivières très anthropisées, surveillées constamment, et aux débits régulés dans la plupart des cas. La sévérité d'un étiage se mesure donc également en fonction des préjudices engendrés. Une situation devient ainsi critique à partir du moment où la diminution des disponibilités en eau ne permet plus de répondre aux besoins, induisant certaines restrictions. Comme le souligne Moreau (2004), « ce qui fait qu'un étiage est sévère, c'est la rupture de l'équilibre entre la disponibilité en eau d'un côté, les habitudes d'usage existant et les besoins des milieux naturels de l'autre ; [...] une quantification de la fréquence de retour ne fait que donner un éclairage insuffisant : selon les usages affectés, la crise sera plus ou moins ressentie ». L'augmentation des activités humaines et des besoins en eau a donc progressivement conduit l'« étiage naturel » vers un « étiage anthropisé », qui modifie les seuils de tolérance ainsi que les critères de sévérité et introduit la notion de risque abordée ci-après. A ce sujet, la revue Géocarrefour publiait en 2006 un numéro au titre évocateur : « la pénurie d'eau : donnée naturelle ou question sociale ? ».

La sévérité d'une situation n'est donc pas uniquement déterminée par l'aléa climatique, mais celui-ci constitue toutefois le premier facteur d'étiage. On associe ainsi naturellement les termes « étiage » et « sécheresse hydrologique ». Pourtant si le terme étiage évoque dans nos esprits l'idée d'indigence, il ne faut pas le confondre avec la sécheresse, et seuls les étiages les plus sévères sont générés par des situations de sécheresse.

2.1 La sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel, à caractère régional, elle touche le monde entier, ses caractéristiques varient d'un régime climatique à un autre, elle se produit aussi bien dans des zones à forte précipitations que dans celles à faibles précipitations, elle constitue un événement climatique extrême, souvent difficile de savoir quand elle commence et d'établir quand elle termine. Elle s'aggrave d'un pays à un autre, selon leurs potentialités naturelles et le niveau de développement (OMM 2006).

Toutes les régions du monde ont été touchées entre 2001 et 2010 par des sécheresses persistantes et particulièrement dévastatrices mentionnons celles qui ont affecté l'Australie (notamment en 2002), l'Afrique de l'Est (en 2004 et 2005, entraînant des pertes en vies humaines et des pénuries alimentaires à grande échelle) et le bassin de l'Amazonie (en 2010) (OMM 2013).

L'Algérie également a connu au cours de ces vingt dernières années, une sécheresse intense et persistante caractérisée par un important déficit pluviométrique (Medejerab et Henia 2011).

2.2. Définition de la sécheresse

Le terme général de "sécheresse" recouvre des notions différentes. En premier lieu, dans sa définition générale elle est évidemment toujours liée à un déficit de la pluviométrie. Toutefois, lorsque ce déficit est systématique, on parle dans ce cas d'aridité. Hors de ces zones désertiques ou arides, la sécheresse est plutôt ressentie comme un épisode et classée par les climatologues dans la catégorie des événements extrêmes. Elle se définira alors par l'intensité de sa déviation par rapport aux valeurs moyennes ou normales de pluviométrie, avec des éléments quantitatifs sur sa durée, sa période d'occurrence et son extension géographique (INRA 2006).

La sécheresse peut être définie comme un déséquilibre naturel mais temporaire de la disponibilité de l'eau, consiste à une précipitation persistante inférieure à la normale, difficile à prévoir, entraînant une diminution de la disponibilité des ressources en eau (Pereira 2009). Elle commence par une diminution du taux d'humidité du sol, puis affecte les réserves des eaux de surface et ensuite elle atteint les eaux souterraines et la nappe phréatique. En période de sécheresse la croissance des plantes ralentit, les lacs se dessèchent, faut aussi restreindre la consommation à des fins domestiques, municipales, agricoles et industrielles. Une sécheresse perturbe momentanément l'écosystème et favorise la propagation de certains insectes nuisibles et de maladies chez les végétaux et les animaux (Hamadene 2011).

2.3. Types de sécheresse

La sécheresse, notion toute relative, se manifeste de plusieurs façons : sécheresse météorologique, sécheresse hydrologique, sécheresse agronomique et sécheresse édaphique.

2.3.1 Sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique se caractérise par une absence prolongée ou un déficit marqué en eau par rapport à la normale. Ces types de sécheresse (Météorologique, agricole, hydrologique, édaphique) peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'élément moteur des autres.

Elle se caractérise par une réduction ou une mauvaise répartition, voir une absence des pluies dans une région donnée pendant une période de temps. La sécheresse météorologique est un phénomène climatique plutôt qu'un aléa proprement dit, mais on la confond souvent avec d'autres conditions climatiques auxquelles elle s'apparente, notamment l'aridité. Elle ne devient dangereuse que lorsqu'elle se transforme en sécheresse agricole ou hydrologique, qui dépend d'autres facteurs dont le seul manque de précipitations (Jouilil et al. 2013).

2.3.2. Sécheresse agronomique ou agricole

La sécheresse agricole est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduit significativement les productions agricoles par rapport à la normale où les valeurs attendues pour une région de grande étendue (Khaldi 2005). Une définition plus précise de ce type de sécheresse ; quand les quantités d'eaux évaporées par les plantes et les cultures et l'évaporation normale dépassent les apports pluviométriques. Une année sera caractérisée par des mois secs et des mois pendant lesquels les réserves en eau se reconstituent. Si le nombre de mois secs consécutifs est trop important on constatera des états de stress de la végétation naturelle et des cultures : on sera alors dans une situation de sécheresse (Charreton 2009).

2.3.3. Sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est caractérisée par une baisse du débit des cours d'eau, du niveau de remplissage des barrages, de la recharge des nappes phréatiques (Charreton, 2009) accompagnée d'une évaporation massive, ainsi que les opérations d'irrigation sont compromises suite à l'affaiblissement prolongé des apports pluviométriques au niveau des bassins versants. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet. Ce type influence la production agricole indirectement par la disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

On est amené à distinguer aussi

La sécheresse du type socioéconomique, diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (eau, fourrage pour le bétail, énergie hydroélectrique, etc.) qui sont tributaires des précipitations. L'offre varie annuellement en fonction des précipitations ou de l'eau disponible ; la demande varie également et souvent associée à une évolution positive due par exemple, à une augmentation de la population, au développement ou à d'autres facteurs (OMM 2006).

La sécheresse Édaphique, causée par une insuffisance de l'eau dans le réservoir superficiel du sol pendant la saison de culture. C'est la sécheresse classique en agriculture, joue directement sur la production agricole.

Ces sécheresses se différencient par leur intensité, leur dynamique de mise en place (brutale ou progressive), leur durée (sécheresse intermittente ou prolongée) et leur époque d'apparition par rapport au cycle cultural (INRA 2006).

2.4. Caractérisation de la sécheresse

La sécheresse est un phénomène pouvant être caractérisée par sa **sévérité** ou son **intensité**, sa **durée**, et son **étendue géographique**.

2.4.1. L'intensité

On parle de l'ampleur du déficit de précipitations et la gravité des conséquences de ce déficit. L'intensité est généralement mesurée par l'écart par rapport à la normale d'un paramètre climatique tel que la hauteur de précipitation, d'un indicateur tel que le niveau des réservoirs ou d'un indice tel que l'indice de précipitation standardisé (OMM 2006).

2.4.2. La durée

La durée est le deuxième trait essentiel de la sécheresse. Si une sécheresse peut débiter rapidement sous certains régimes climatiques, il lui faut généralement deux à trois mois au moins pour s'installer; elle peut ensuite persister pendant des mois ou des années. L'ampleur des effets de la sécheresse est étroitement liée au moment où débute la pénurie de précipitations, à l'intensité de celle-ci et à la durée du phénomène (OMM 2006). Nous pouvons détailler encore plus sur les caractéristiques de la sécheresse dans le schéma ci-après en prenant l'exemple de l'utilisation de l'indice SPI-12 pour l'évaluation de phénomène dans la région d'Annaba.

2.4.2. L'étendue spatiale

Les sécheresses diffèrent aussi par leurs caractéristiques spatiales c'est-à-dire la surface touchée par la sécheresse. Dans les pays de grande superficie (Brésil, Chine, Inde, États-Unis, Australie, etc.) la sécheresse touche rarement, voire jamais, le pays entier. En 1934, lors de la

pire sécheresse qu'eurent à subir les États-Unis plusieurs années durant, seulement 65 % du territoire américain furent touchés par une sécheresse intense ou extrême cela a été l'étendue spatiale maximale de la sécheresse dans ce pays pendant la période 1895-2005 (OMM 2006)

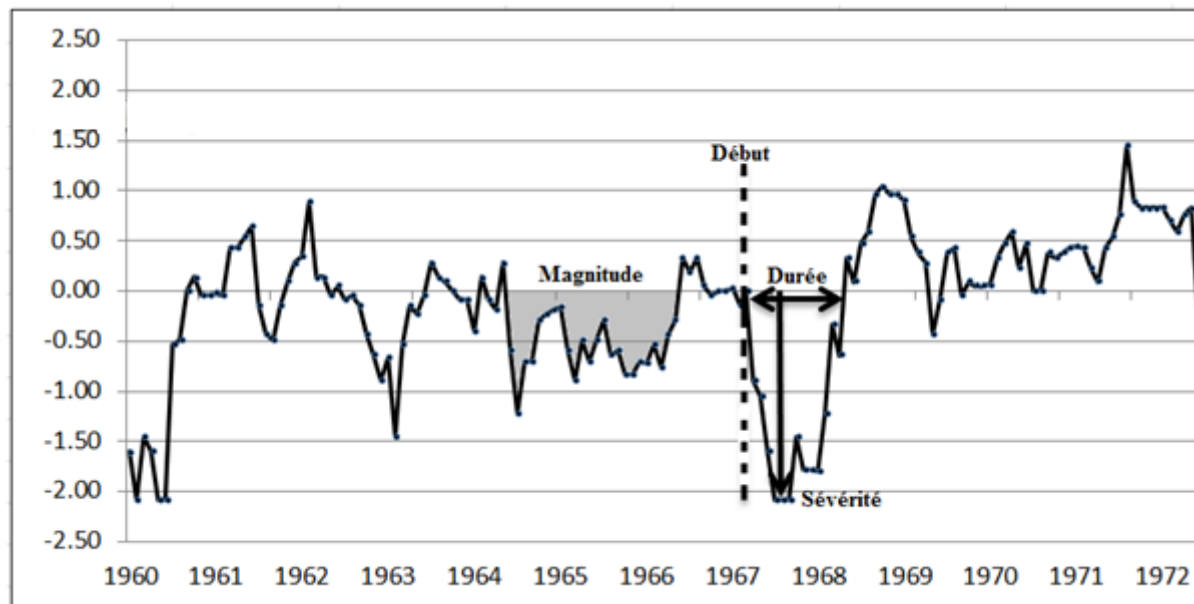


Fig 1. Les caractéristiques de la sécheresse, exemple en utilisant l'indice SPI-12 sur la région d'Annaba période 1960-1972

2.5. Les impacts de la sécheresse

Il n'y a que peu de pays qui rapportent systématiquement les pertes et effets dus à la sécheresse ; pourtant ses impacts sur la production agricole, les moyens de subsistance ruraux et les secteurs urbains et économiques sont manifestes et considérables. Les sécheresses contribuent également à la migration, au conflit et à la dégradation des écosystèmes.

Dans les sécheresses signalées à l'échelle internationale depuis 1900, plus de 11 millions de personnes ont trouvé la mort et plus de 2 milliards de gens ont été touchés (EM-DAT, 2010b), ce qui constitue un bilan plus lourd que pour n'importe quel autre aléa physique.

Toutefois, l'essentiel de la mortalité due à la sécheresse enregistrée dans EM-DAT est survenue dans des pays traversant aussi des conflits politiques et civils. De surcroît, depuis les années 1990, la mortalité due à la sécheresse signalée à l'échelle internationale est insignifiante, puisqu'on ne dénombre que 4 472 victimes de 1990 à 2009 (EM-DAT, 2010b). Les impacts de la sécheresse sont mal notifiés à l'échelle internationale. Cela s'explique par le manque de dégâts visibles en dehors du secteur agricole, la proportion élevée de pertes indirectes par rapport aux pertes directes et la nature extrêmement complexe de la mortalité due à la sécheresse, qui est fortement tributaire des moyens de subsistance (Below *et al.*, 2007).

Du fait de l'absence de données systématiques, il est impossible de fournir une estimation mondiale des schémas et tendances qui se dégagent des impacts et des pertes dus à la sécheresse. Néanmoins, les informations disponibles donnent une bonne indication de l'ampleur et de l'interconnexion de ces impacts sur la mortalité, les moyens de subsistance ruraux, la sécurité alimentaire, la production agricole, le développement économique et urbain, la migration, les conflits, l'environnement et les dépenses publiques.

2.6. Exemples des impacts de sécheresses agricoles et hydrologiques à travers le monde

2.6.1 Mortalité et bien-être :

À l'échelle internationale, le risque de mortalité due à la sécheresse est extrêmement mal notifié à l'heure actuelle et il se peut que la mortalité due à la sécheresse soit beaucoup plus élevée que les chiffres ne le laissent à penser ; en effet, de nombreuses victimes ne sont pas enregistrées ou sont attribuées à d'autres causes. Ainsi, au Mozambique, seuls 18 décès ont été signalés à l'échelle internationale entre 1990 et 2009. Pourtant, la base de données des pertes dues aux catastrophes du Mozambique fait état de 1 040 victimes pour la même période (EM-DAT, 2010b ; INGC, 2010).

Les ménages pauvres des zones rurales dont les moyens de subsistance dépendent de l'agriculture pluviale sont plus vulnérables à la sécheresse et moins capables d'amortir et d'absorber les pertes. Parmi les conséquences figurent une pauvreté accrue, un développement humain réduit et des impacts néfastes sur la santé, la nutrition et la productivité (de la Fuente et Dercon, 2008 ; ONU/SIPC, 2009), un pouvoir d'achat en recul et des inégalités de revenu qui se creusent (Rathore, 2005). Comme avec le peuple navajo, il est rare que les ménages pauvres des zones rurales puissent mobiliser des biens suffisants pour amortir les pertes de récoltes et de bêtes ; en outre, les sécheresses tendent à fragiliser les mécanismes de survie des ménages et des communautés car un grand nombre de ménages sont touchés simultanément et pour de longues périodes.

2.6.2. Moyens de subsistance ruraux, sécurité alimentaire et production agricole

Dans les Caraïbes, la sécheresse de 2009-2010 a vu la récolte de bananes en Dominique sapée de 43 pour cent, la production agricole de Saint-Vincent-et-les Grenadines réduite de 20 pour cent par rapport à la moyenne historique et les rendements d'oignons et de tomates à Antigua-et-Barbuda en repli de 25 à 30 pour cent. Lors de la sécheresse de 2002-2003, l'Australie a essuyé des pertes de 2,34 milliards US\$, qui ont réduit le PIB national de 1,6 pour cent. Les deux tiers des pertes étaient agricoles et le reste était attribué à l'effet boule de neige sur les autres secteurs de l'économie (Horridge et al., 2005).

Au cours de la sécheresse de 2002, la production de céréales alimentaires en Inde est tombée à 183 millions de tonnes, contre 212 millions de tonnes l'année précédente (Shaw et al., 2010). Lors de la sécheresse de 2007-2008 en République arabe syrienne, 75 pour cent des agriculteurs du pays ont enduré l'anéantissement total de leur récolte et, plus d'un an après la fin de la sécheresse, les effectifs de bétail étaient encore inférieurs de 50 pour cent à leur niveau d'avant la sécheresse (Erian et al., 2010).

Le Mozambique est l'un des rares pays ayant une base de données sur les catastrophes qui enregistre systématiquement les pertes dues à la sécheresse (INGC, 2010), de sorte que l'échelle réelle du risque de catastrophe devient visible. Depuis 1990, les événements liés à la sécheresse ont endommagé 8 millions d'hectares de cultures (dont la moitié ont été détruites) et affecté 11,5 millions de personnes (Figure 3.7). On voit donc que le fait que les pertes dues à la sécheresse soient sous-notifiées à l'échelle internationale diminue la visibilité du risque de sécheresse et sape les arguments politiques et économiques en faveur de sa réduction, tout en occultant les implications considérables en termes de moyens de subsistance des petits exploitants, surtout les agricultrices ou les exploitants âgés, ou encore les ménages dirigés par des femmes.

2.6.3. Développement urbain et économique

Les sécheresses réduisent les approvisionnements en eau pour la consommation domestique ou industrielle et pour la production d'énergie, affectant ainsi les villes et les secteurs non agricoles de l'économie. Durant la sécheresse de 1991-1992 au Zimbabwe par exemple, les pénuries d'eau et d'électricité et une baisse de la productivité industrielle de 9,5 pour cent ont donné lieu à une réduction de 2 pour cent des recettes à l'exportation (Robinson, 1993 ; Benson et Clay, 1998). Le coût total pour l'économie du repli de la production d'énergie dû à la sécheresse a été supérieur à 100 millions US\$ et 3 000 emplois (Benson et Clay, 1998).

En 2008, une grave sécheresse dans le sud-est des États-Unis d'Amérique a menacé l'approvisionnement en eau pour le refroidissement de plus de 24 des 104 réacteurs nucléaires du pays. La sécheresse européenne et la vague de chaleur survenues en 2003 ont réduit la capacité de génération d'énergie nucléaire de la France de 15 pour cent pendant cinq semaines et elles ont aussi entraîné une réduction de 20 pour cent de la production hydroélectrique du pays (Hightower et Pierce, 2008). Au cœur de la sécheresse ayant touché l'Espagne de 1991 à 1995, la production hydroélectrique a été réduite de 30 pour cent et 12 millions de citoyens ont connu des restrictions d'eau (Mestre, 2010).

2.6.4. Migration

Les sécheresses sont associées à la migration. En République arabe syrienne, un million de personnes ont quitté les zones rurales pour gagner les villes suite à plusieurs récoltes déficitaires consécutives de 2007 à 2009 (Erian et al., 2010). En réponse à des sécheresses récurrentes et à des moyens de subsistance ruraux marginaux, la moitié de tous les Mexicains vivant en zones rurales ont migré vers les centres urbains durant le XX^e siècle (Neri et Briones, 2010). Au Rajasthan, en Inde, les sécheresses ont régulièrement entraîné une migration forcée, avec un accroissement des emprunts et de l'endettement, une réduction de la consommation alimentaire, du chômage et plus de problèmes de santé (Rathore, 2005). Sachant que la sécheresse a caractérisé 47 années du siècle écoulé, cela sous-entend un impact profond sur les moyens de subsistance ruraux.

La migration débouche sur une modification des schémas décisionnels des ménages, qui se traduit souvent par une augmentation du nombre de ménages dirigés par les femmes. Des études de cas menées en Jordanie et au Liban montrent que les dynamiques de la famille et les rôles publics des femmes sont aussi en train de changer profondément du fait du phénomène de migration associé à la sécheresse (Erian et al., 2010).

2.6.5 Conflit

Les sécheresses augmentent la probabilité de conflit car elles provoquent déplacements et migrations, une concurrence accrue sur des ressources rares et une intensification des tensions ethniques ; elles encouragent aussi les agriculteurs pauvres des zones rurales à rejoindre les groupes de résistance armés (Barnett et Adger, 2007 ; Reuveny, 2007). Depuis les années 1950, les sécheresses ont précipité des vagues de migration et contribué à de violents conflits en Inde et au Bangladesh ; les sécheresses des années 1980 et 1990 ont contribué à précipiter un conflit ethnique et des affrontements frontaliers entre la Mauritanie et le Sénégal (Reuveny, 2007)

Une analyse de la sécheresse sur 1 100 ans en Afrique de l'Est équatoriale a révélé des famines, des troubles politiques et une migration à grande échelle, tous provoqués par des sécheresses, au cours des six siècles ayant précédé 1895 (Verschuren et al., 2000). La sécheresse a peut-être aussi contribué à précipiter la révolution mexicaine de 1910 (Neri et Briones, 2010). Plus récemment, des sécheresses ont été associées à des émeutes au Maroc durant les années 1980 (Swearingen, 1992) et ont contribué à la partition entre l'Érythrée et l'Éthiopie en 1991 (Reuveny, 2007).

2.6.6. Environnement

Les sécheresses affectent les habitats, les plans d'eau, les rivières et les ruisseaux et peuvent avoir de profonds impacts écologiques, en accroissant la vulnérabilité et la migration des espèces et en entraînant une perte de la biodiversité (Lake, 2003 ; NDMC, 2006 ; Shaw et al., 2010). Entre 1999 et 2005, les sécheresses ont contribué à la perte d'au moins 100 000 hectares de marais salants le long du littoral de la Floride (Silliman et al., 2005). En Espagne, la sécheresse de 1991 à 1995 a entraîné indirectement l'assèchement des zones humides, provoquant une intrusion de l'eau de mer dans les aquifères côtiers ; en outre, la superficie touchée par les feux de forêts en Espagne méridionale a augmenté de 63 pour cent par rapport à la décennie précédente (Mestre, 2010).

2.6.7. Dépenses publiques

Les impacts en aval montrent une augmentation de la concurrence et des conflits entre les différentes catégories d'utilisateurs de l'eau et la nécessité d'un accroissement des dépenses publiques destinées aux secours et aux compensations. Dans l'Andhra Pradesh, en Inde, par exemple, l'irrigation du riz dépend de plus en plus du pompage des eaux souterraines. Comme l'énergie pour le pompage est subventionnée par l'État, cela se traduit non seulement par des nappes phréatiques toujours plus basses mais aussi par le fait que la culture rizicole ponctionne les fonds publics et contribue à des pannes d'électricité périodiques (Lvovsky

et al., 2006). Le coût de l'aide alimentaire et non alimentaire octroyée en réponse à la sécheresse de 1991-1992 dans dix pays d'Afrique australe a dépassé 950 millions US\$ et, durant la sécheresse de 2007 à 2009 au Kenya, 70 pour cent de la population d'une région été tributaire de l'aide alimentaire (Holloway, 1995 ; Galu et al., 2010).

3 Tendances de l'aridité depuis 1900

Divers signes suggèrent que le monde est devenu plus sec au cours du siècle écoulé. Il ne fait aucun doute que depuis les années 1970, l'aridité a augmenté dans certaines parties de l'Afrique, de l'Europe méridionale, de l'Asie de l'Est et du Sud et de l'Australie orientale, modifiant les données de référence concernant les précipitations et rendant encore plus compliquée la surveillance des sécheresses (Trenberth et al., 2007 ; Dai, 2010). Ainsi, entre les années 1950 et les années 1980, le pourcentage de la surface terrestre classé comme étant « sec » était de 10 à 14 pour cent, atteignant les 25 à 30 pour cent au cours de la décennie écoulée (Dai, 2010). L'une des raisons tient au fait que les températures plus chaudes de l'air et de surface ont augmenté l'évaporation. Les tendances séculaires des précipitations mondiales mesurées chaque mois au moyen de l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer révèlent une tendance générale à l'assèchement en Afrique sahélienne et australe, dans le centre du Brésil, dans le sud de l'Europe, en Iran (République islamique d'), en Indonésie, au nord-est de la Chine et au nord-est de l'Australie (Trenberth et al., 2007).

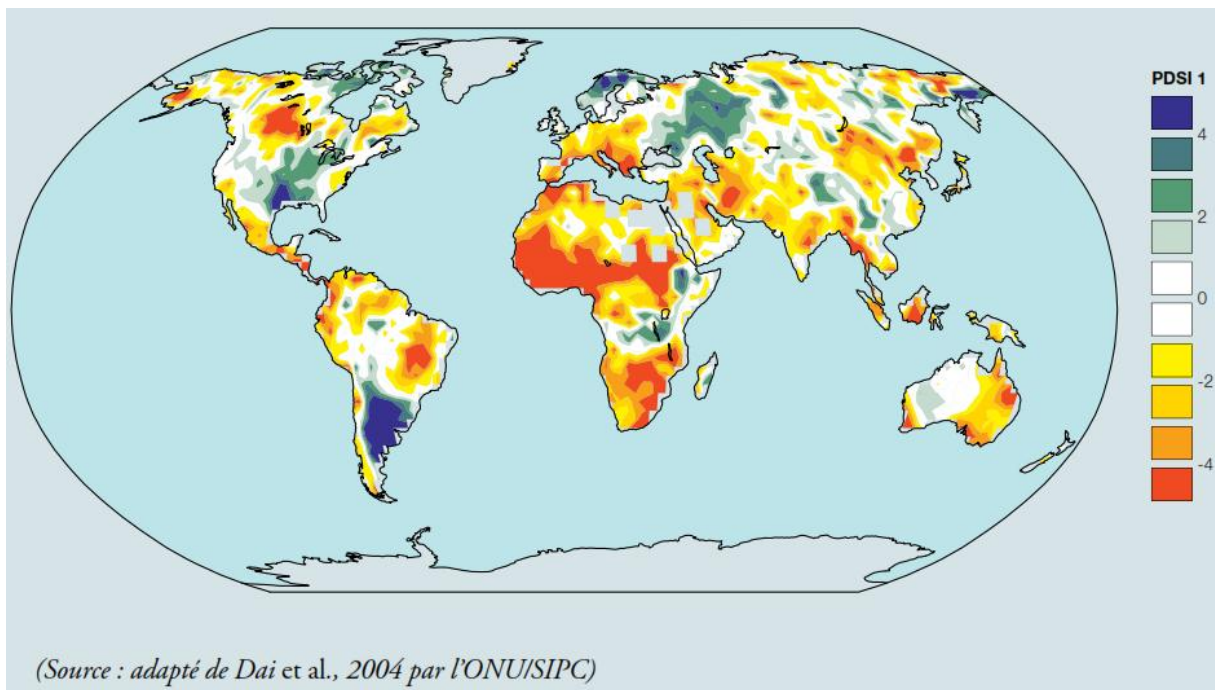


Fig 2. Tendances des précipitations mondiales depuis 1900 mesurées à l'aide de l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI)

4. Le risque associé à l'étiage

Si la sévérité d'une situation est directement liée à l'intensité et à la durée de la sécheresse, celle-ci sera plus ou moins ressentie selon la vulnérabilité du milieu. Le rôle des activités humaines ne peut donc pas être ignoré dans la mesure où les pressions exercées par l'homme accroissent cette vulnérabilité. L'analyse des étiages est en relation directe avec les problèmes de pénurie d'eau (Corbonnois et Humbert, 2000) car les étiages deviennent sévères dès lors que le manque d'eau influe sur les capacités à répondre aux besoins en eau de la société. L'étiage est donc un phénomène dont la composante sociale et économique doit être prise en compte, car si les extrêmes hydrologiques intéressent tant, c'est essentiellement par le risque qu'ils engendrent pour les sociétés.

Les principales activités menacées par une pénurie de la ressource en eau superficielle sont : la navigation, l'alimentation en eau potable, la production d'énergie électrique (hydraulique, thermique et nucléaire), l'agriculture (irrigation) et le tourisme (pêche, plan d'eau, etc.). Par ailleurs, l'impact d'une baisse des débits sur la qualité des eaux doit être souligné car on peut observer une mortalité accrue des espèces aquatiques et une augmentation de la pollution liée à la faible dilution des effluents.

5. Quelles grandeurs pour caractériser les étiages ?

Le choix des grandeurs d'étiage peut dépendre des objectifs d'un travail mais peut également résulter d'une contrainte imposée par un cadre législatif si l'étude est réalisée dans un contexte opérationnel. De nombreuses synthèses bibliographiques recensent de manière assez exhaustive les différentes variables d'étiage existantes (Abi-Zeid et Bobée, 1999 ; Pyrcce, 2004 ; Smakhtin, 2001, etc.). On distingue ainsi généralement les variables issues de la courbe des débits classés, qui tiennent compte de tous les débits moyens journaliers disponibles, des variables qui replacent l'étiage dans un contexte événementiel.

5.1. Les débits d'étiage issus de la courbe des débits classés

Les grandeurs issues de la courbe des débits classés (figure 3) sont appelées débits caractéristiques (ou débits fréquentiels). On recense :

***Le Débit Caractéristique d'Étiage (ou DCE)**, qui correspond au débit égalé ou dépassé 355 jours par an ;

***Les Débits Caractéristiques** de durées 11, 9 et 6 mois : DC11, DC9 et DC6, débits dépassés respectivement 335, 274 et 182 jours dans l'année. Ces débits caractéristiques peuvent également s'exprimer en pourcentage puisqu'il s'agit de près des valeurs dépassées 90, 75 et 50 % de l'année ;

*L'**étiage absolu** (ou minimum absolu), qui ne passe pas nécessairement par la courbe des débits classés, mais se fonde de la même manière sur tous les débits moyens journaliers disponibles car il représente le plus bas débit connu d'un cours d'eau.

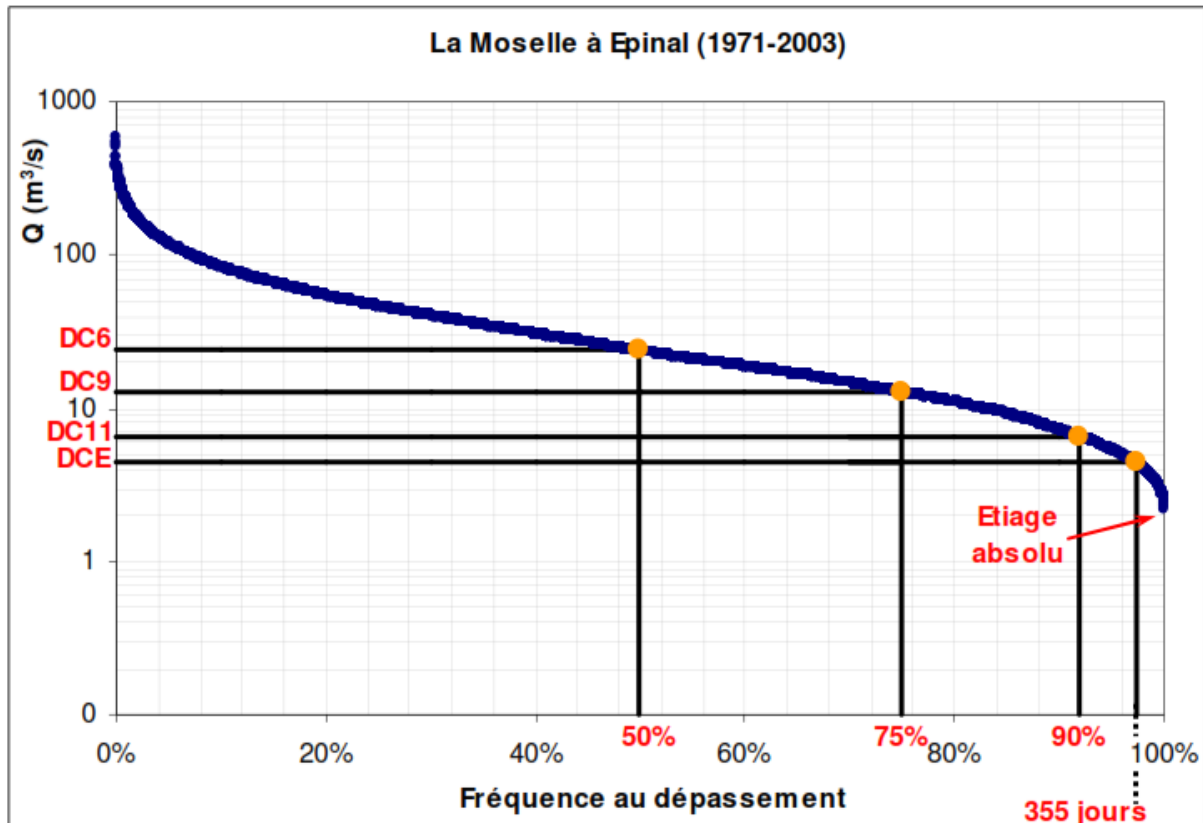


Fig 3. Courbe des débits classés et débits caractéristiques associés (exemple de station) .

Ces valeurs permettent d'aborder les étiages de manière simple, sans traitement statistique élaboré, et de représenter les débits les plus indigents.

5.2. Les débits d'étiage à l'échelle annuelle

Pour caractériser l'étiage annuel on distingue les variables extraites à partir d'un critère temporel fixe (QMNA, VCND et QCN) de celles paramétrées par un débit fixe (volumes et durées déficitaires). On distingue par ailleurs les débits d'étiage issus de l'échelle mensuelle, en particulier le **QMNA, débit moyen mensuel le plus bas de l'année**, préconisé par la loi sur l'Eau (1992), des débits d'étiage calculés à partir des valeurs journalières.

La variable d'étiage la plus usuelle correspond au **VCND**, choisi notamment aux Etats-Unis et au Canada (Hortness, 2006 ; Pyrcce, 2004) comme valeur de référence. Le **VCN7** (débit moyen minimum de l'année calculé sur 7 jours consécutifs) est cependant moins utilisé en France, la valeur de référence étant le QMNA.

Le QMNA est certes une valeur facile à extraire, mais elle peut être peu représentative d'un étiage car elle est soumise à l'échelle calendaire. Les débits d'étiage peuvent en effet être observés durant une période chevauchant deux mois, induisant une surestimation du débit d'étiage par le QMNA (exemple figure 4). D'autre part, un travail préalable a montré qu'il serait opportun d'utiliser un pas de temps inférieur pour caractériser les étiages des cours d'eau étudiés, afin de limiter l'influence des précipitations (Lang, 2004). La nécessité de compléter les valeurs moyennes déterminées dans un cadre mensuel arbitraire, par des valeurs moyennes d'une série de jours consécutifs, est une idée déjà soumise par Frécaut (1975).

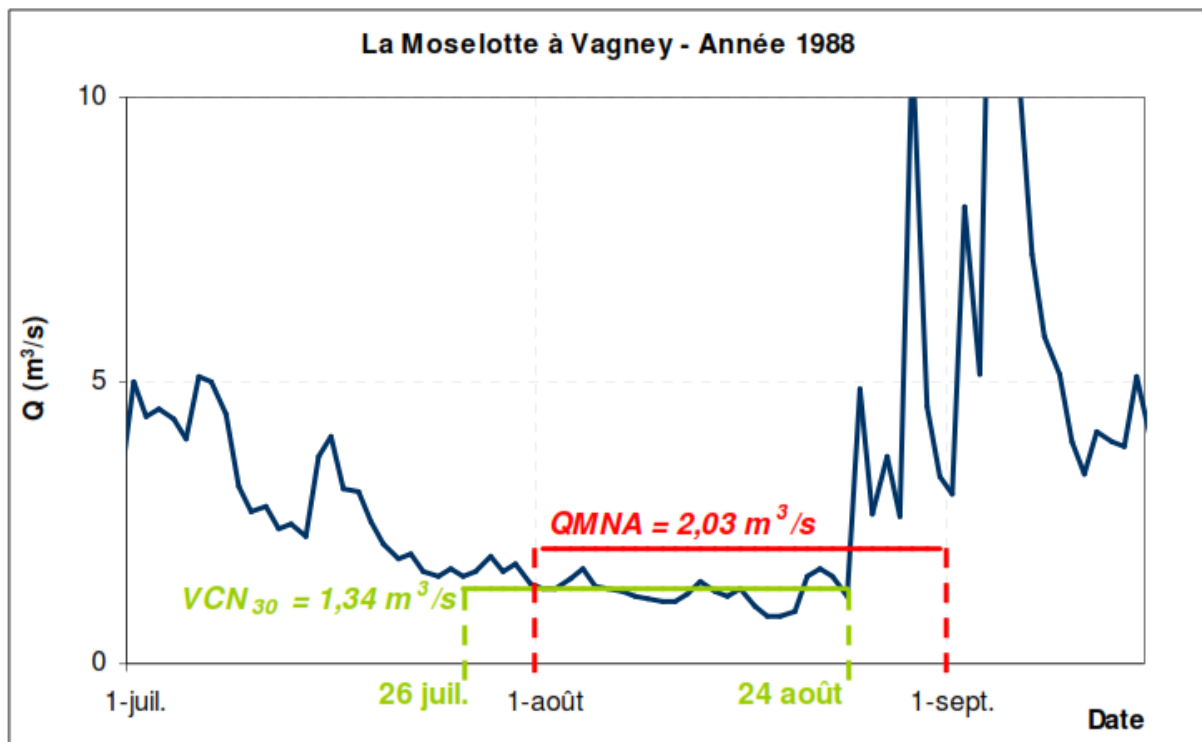


Fig 4. Illustration de la contrainte de l'échelle calendaire associée au QMNA.

- Les VCNd et les QCND sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée d . De moyennes mobiles calculées à partir des débits moyens journaliers sur d jours consécutifs aboutissent au calcul des VCNd, débit moyen minimum sur d jours, alors que les QCND correspondent au débit maximal non dépassé sur une durée de d jours consécutifs. La durée optimale pour le calcul des VCNd et des QCND d doit être en relation avec la définition que l'on attribue à l'étiage, mais aussi avec le caractère plus ou moins anthropisé des cours d'eau.

- Les volumes et durées déficitaires : la seconde approche consiste à fixer une valeur de débit utilisée comme limite afin d'extraire par année les volumes et les durées déficitaires, périodes où les débits sont inférieurs au seuil fixé. La difficulté réside dans le choix d'un seuil

adapté qui consiste finalement à définir la limite des débits d'étiage. Le choix de cette limite de débit d'étiage peut s'appuyer sur les débits caractéristiques issus de la courbe des débits classés.

Le tableau ci-dessous (tableau 1) résume les différentes variables abordées ci-dessus.

Tableau extrait de Abi-Zeid et Bobée (1999), modifié.

Critère	Grandeur d'étiage	Définition
Durée calendaire	- QMNA	- Débit moyen mensuel minimum de l'année
Durée	- DCE - DC_x - VCN_d - QCN_d	- Débit non dépassé pendant 10 jours par an - Débits non dépassés $x\%$ de l'année - Minimum de l'année de la moyenne mobile des débits sur d jours consécutifs - Maximum non dépassé par an de la moyenne mobile des débits sur d jours consécutifs
Débit	- Volume total - Durée totale - Volume maximal - Durée maximale	- Volume total sous un seuil - Durée totale sous un seuil - Volume maximal sous un seuil - Durée maximale sous un seuil

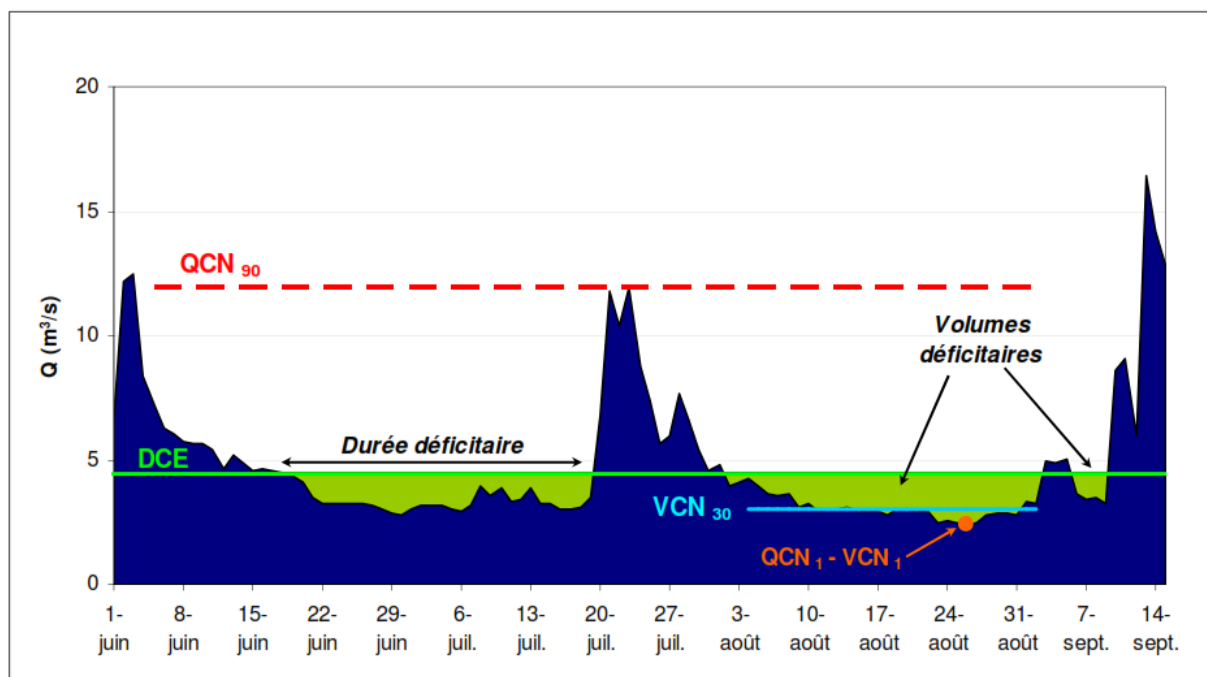


Fig 5. Grandeurs de l'étiage au pas de temps journalier

Il reste à désigner les variables qui nous paraissent les plus pertinentes. Mais quelles que soient les variables sélectionnées, il s'avère difficile de prendre en considération toute la complexité d'un étiage à travers une seule grandeur.

Les variables d'étiage peuvent être, soit fixées par une durée, soit fixées par un débit limite. Le QMNA, qui ne répond ni à l'un ni à l'autre est régulièrement parasité par des

épisodes de précipitations, néanmoins, du fait de sa valeur réglementaire, il n'est pas inintéressant de le positionner par rapport aux variables retenues ici.

5.3. Choix et critique du VCN10

Le pas de temps de 10 jours semble opportun car il se rapproche des conclusions de l'analyse statistique du nombre de jours sans pluie consécutifs, dont 10 jours constituent une séquence très probable (de fréquence biennale). La probabilité d'avoir des séquences supérieures à 10 jours diminue ensuite rapidement. La durée de 10 jours pour le calcul des VCN pourrait donc garantir des débits stabilisés dans la plupart des cas, ce qui est moins garanti avec des durées plus longues ou le QMNA. A l'inverse, une durée inférieure à 10 jours risque d'accorder trop de poids aux bas débits fréquemment perturbés ou erronés (problème de courbe de tarage). Le VCN est par ailleurs proche du VCN valeur réglementaire dans de nombreux pays, notamment aux Etats-Unis (Riggs, 1980, cité par Kroll et Vogel., 2002). Enfin Laborde, définit également le VCN 7 comme l'étiage (1984).

Le VCN présente toutefois l'inconvénient de rattacher le débit d'étiage à une durée, sans tenir compte des niveaux observés. La sélection des débits d'étiage à partir du seul critère temporel, sans prise en compte des niveaux hydrologiques eux-mêmes, peut paraître insuffisante. De plus, en bornant à une durée théorique de 10 jours, il n'est pas possible d'envisager une analyse de la durée de l'étiage. L'usage du VCN 10 apparaît donc comme une grandeur pratique, cohérente avec les contraintes climatiques, mais qui ne répond toutefois pas à la question : « qu'est-ce qu'un débit d'étiage ? ». Il nous semble pourtant opportun de tenter d'y répondre en proposant une limite aux débits d'étiage. Comme le souligne d'ailleurs Frécaut (1975), « il semble plus satisfaisant de définir une valeur de débit au-dessous de laquelle on peut estimer valablement qu'il y a étiages ». Le recours à un débit limite permet d'appréhender l'étiage différemment, en tronquant par exemple les échantillons de VCN10. La définition d'un débit limite mérite cependant quelques explications.

5.4 Le débit limite d'étiage

L'analyse des étiages peut donc également être abordée en fixant une limite aux débits et seules les valeurs inférieures à cette limite sont retenues pour la statistique des débits d'étiage. La détermination de ce débit limite, que nous pouvons appeler « débit limite d'étiage », peut s'appuyer sur la courbe des débits classés :

Le débit caractéristique d'étiage (DCE), débit non dépassé durant 10 jours par an, peut être utilisé en tant que débit seuil d'étiage puisqu'il s'agit d'une valeur de débit d'étiage. Les travaux recensés dans la bibliographie, qui s'intéressent à la statistique des volumes et des durées déficitaires, utilisent des valeurs de débits correspondant généralement à des fréquences au dépassement comprises entre 70 et 95 % de la courbe des débits classés (Fleig et al., 2006) : on peut citer Gottschalk et al. (1997) qui se fondent sur le seuil 70 % ou encore El-Jabi et al. (1997) qui ont recours au seuil 90 % ; Tallaksen et al. (1997) réalisent une analyse des durées et volumes déficitaires pour laquelle trois seuils différents sont utilisés : 50, 70 et 90 %.

La définition de la limite entre les basses eaux et l'étiage est difficile à déterminer et s'accompagne dans tous les cas d'une part de subjectivité. Pour cette recherche, nous choisissons de définir cette limite au débit le plus fréquent ou débit modal (au sens du mode statistique).

Les travaux dirigés de module

TD 1 Questions d'ordre général : Exercices rédactionnels

- 1- Quelle est la différence entre la sécheresse et l'aridité ?
- 2- Donnez le lien entre la sécheresse et l'étiage ?
- 3- Quelles sont les caractéristiques de la sécheresse et de l'étiage ?
- 4- Quelles sont les différents types de sécheresse ?
- 5- Qu'est-ce que c'est le tarissement ?
- 6- Quelles sont les différents débits d'étiage qu'on peut tirer d'une courbe de débit ?
- 7- Qu'est-ce que c'est une courbe des débits classés ?
- 8- En quoi est utile de connaître les basses eaux et les hautes eaux ?
- 9- Qu'est-ce qui différencie la période des basses eaux au période d'étiage ?
- 10- Peut-on catégoriser l'étiage à un événement extrême pourquoi ?

TD numéro 2

1- Dessinez les graphiques de variations des débits moyens pour chaque cas de la station X

Année 1948-1949

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.17	0.86	4.8	4.01	29.63	10.29	15.33	5.54	1.97	0.66	0.37	0.26

Année 1950-1951

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.98	7.09	2.47	9.17	13.74	28.65	9.73	8.64	4.33	1	0.54	0.58

Année 2000-2001

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.07	0.22	0.17	0.16	0.19	0.45	0.24	0.28	0.09	0.02	0.02	0.07

- 2- Commentez les graphiques.
- 3- Faites une comparaison entre les graphiques ;
- 4- Tirez des graphiques la période des basses et des hautes eaux.
- 5- Qu'es ce que vous constatez ?

TD numéro 3

- 1- En utilisant les mêmes données de l'exercice précédent, complétez le tableau des débits classés ensuite dessinez la courbe des débits classés pour chaque cas et commentez les résultats.

Année 1948-1949

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.17	0.86	4.8	4.01	29.63	10.29	15.33	5.54	1.97	0.66	0.37	0.26

Année 1950-1951

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.98	7.09	2.47	9.17	13.74	28.65	9.73	8.64	4.33	1	0.54	0.58

Année 2000-2001

Mois	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Janv.</i>	<i>Févr.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>
Q-Moy (m³/s)	0.07	0.22	0.17	0.16	0.19	0.45	0.24	0.28	0.09	0.02	0.02	0.07

Exemple de tableau

Mois	Débit moyen	Débit classé	Rang	Fréquence = (N/n)	Probabilité (1/F)*100
<i>Sept</i>					
<i>Oct.</i>					
<i>Nov.</i>					
<i>Dec.</i>					
<i>Jan.</i>					
<i>Fev.</i>					
<i>Mars.</i>					
<i>Avril.</i>					
<i>Mai.</i>					
<i>Juin.</i>					
<i>Juil.</i>					
<i>Aout.</i>					

TD numéro 4 : Calculez en se basant sur ces données l'indice de pourcentage à la normal pour l'échelle de 1 3 6 et 12 mois :

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
1980	5.4	17.5	59.3	187.6	18.2	61.8	52.2	28.5	25.5	23.9	0.0	26.9
1981	0.0	50.9	26.1	79.4	144.6	59.1	45.9	35.1	65.2	0.0	0.4	5.5
1982	18.2	89.3	80.7	96.9	5.5	28.6	19.5	16.3	6.0	0.8	3.0	16.9
1983	15.8	58.5	27.4	51.6	186.3	139.7	58.1	26.9	58.9	2.7	0.0	0.0
1984	17.9	107.5	3.0	151.3	53.5	30.6	162.1	30.0	45.5	0.0	0.0	0.0
1985	52.5	29.1	54.7	45.4	43.6	42.9	122.9	17.8	7.4	18.0	1.4	0.0
1986	13.5	50.5	87.4	173.7	50.0	101.9	40.0	21.1	28.5	2.7	0.9	0.0
1987	10.4	39.6	85.1	19.5	22.2	41.5	39.0	43.2	16.4	17.0	0.0	0.0
1988	61.1	0.0	70.4	178.5	47.0	15.0	33.9	38.9	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	43.5	21.3	39.1	17.5	103.4	0.0	31.5	65.7	62.3	29.9	0.0	42.3
1990	2.5	17.6	54.5	154.0	38.0	48.3	69.1	52.9	11.4	0.0	5.5	4.7
1991	2.1	92.7	12.7	18.6	81.1	56.5	60.7	66.7	49.2	1.0	2.2	0.0
1992	9.2	5.7	61.1	170.0	37.9	33.1	69.9	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1993	57.6	29.1	38.1	45.3	28.2	53.8	0.0	45.3	6.7	0.0	0.0	0.0
1994	73.5	42.6	13.8	52.7	197.8	11.3	94.3	32.6	0.0	21.8	0.0	11.7
1995	19.7	14.9	3.0	39.9	47.9	203.1	54.9	65.2	32.4	17.5	0.0	0.0
1996	45.0	13.1	49.3	36.7	25.2	4.5	12.4	26.0	10.0	18.1	0.0	22.3
1997	43.0	104.6	98.8	72.2	17.0	54.5	34.6	46.6	147.2	0.0	0.0	0.0
1998	40.8	46.9	118.4	58.5	104.0	80.2	41.8	8.9	12.0	0.0	0.0	0.0
1999	26.9	17.5	49.3	146.4	18.7	4.0	14.5	16.6	38.9	0.8	0.0	0.0
2000	4.0	34.5	16.1	64.0	148.8	28.8	14.1	51.3	28.7	0.0	0.0	2.1
2001	34.0	6.4	20.0	36.3	47.2	53.6	38.1	2.5	10.4	0.0	18.6	27.2
2002	3.6	5.3	177.6	49.7	205.7	56.3	24.9	177.4	18.0	0.0	0.0	0.0
2003	38.6	46.1	20.6	147.2	74.5	36.2	29.7	89.8	90.2	12.9	0.0	0.0
2004	12.8	21.6	68.1	85.3	43.5	89.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2005	11.4	13.8	32.6	156.8	110.8	91.8	21.7	12.4	29.8	0.6	0.0	52.3
2006	52.3	9.2	3.1	99.8	5.6	12.9	168.9	129.5	10.5	0.0	0.0	0.0
2007	60.1	116.1	129.7	114.8	5.5	17.3	129.2	31.7	65.5	11.5	0.0	0.0
2008	50.3	28.3	105.9	47.6	166.6	28.6	54.1	68.5	20.8	0.0	0.0	26.2
2009	30.6	16.5	75.7	72.5	53.0	32.3	68.8	15.8	32.1	11.1	0.0	12.1
2010	3.2	105.0	66.7	53.6	35.5	132.0	24.5	49.4	83.2	34.1	0.0	0.0
2011	6.4	53.4	121.4	97.8	93.9	223.4	72.3	90.7	10.3	2.4	0.0	3.5
2012	32.8	49.5	21.9	40.2	73.8	77.3	43.0	13.4	4.3	0.0	0.0	61.8

TD Numéro 5

En se basant sur la même série Calculez l'indice Z-Score pour les échelles 1, 3 et 6 mois

- 1- Dessinez les variations chronologiques de l'indice pour les trois échelles
- 2- Commentez les trois graphiques
- 3- Calculez les sévérités de chaque épisode.
- 4- Remplissez le tableau Épisode / Sévérité.

TD Numéro 6

En se basant sur la même série Calculez l'indice SPI pour les échelles 1, 3 et 6 mois

- 1- Dessinez les variations chronologiques de l'indice pour les trois échelles
- 2- Commentez les trois graphiques
- 3- Calculez les sévérités de chaque épisode.
- 4- Remplissez le tableau Épisode / Sévérité.
- 5- Que constatez-vous comme différences entre les deux indices ?
- 6- Tirez les avantages de chacun d'eux selon les résultats.

TD Numéro 7

Utilisez la même série et évaluez la sécheresse en utilisant d'autres indices. à savoir CZI, MCZI ; la méthode des quintiles

TD Numéro 8

Vous avez la série des débits moyens mensuels de la station X au cours de la période montré au tableau ci-après

- 1- On vous demande de calculer les débits moyens annuels
- 2- Calculez les débits moyens mensuels interannuels
- 3- Comparez les années à forte et à forte hydraulicité.

La série des données de débits mensuels

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1964	0.17	0.86	4.80	4.01	29.63	10.29	15.33	5.54	1.97	0.66	0.37	0.26
1965	0.38	0.40	0.62	0.76	3.94	9.39	2.23	0.78	0.65	0.26	0.19	0.17
1966	0.98	7.09	2.47	9.17	13.74	28.65	9.73	8.64	4.33	1.00	0.54	0.58
1967	0.59	0.55	1.42	21.62	23.60	10.00	15.67	3.78	4.56	1.37	0.66	0.81
1968	0.54	2.36	19.66	6.09	14.29	18.07	11.59	11.05	4.06	1.37	0.69	0.63
1969	0.73	1.08	2.20	5.03	7.70	8.36	7.01	8.38	1.90	0.73	0.39	0.46
1970	0.23	0.30	0.36	0.74	4.19	1.69	2.16	3.54	0.80	0.42	0.24	0.19
1971	2.86	2.46	1.34	18.91	4.39	2.06	6.42	8.18	3.06	0.91	0.40	0.24
1972	0.23	0.42	0.39	0.51	3.98	11.26	9.24	9.86	1.63	0.57	0.33	0.17
1973	0.28	4.09	0.62	0.63	17.27	6.98	6.03	19.50	5.89	1.28	0.55	0.32
1974	0.80	0.83	0.56	1.42	17.49	12.52	41.17	10.69	2.30	1.40	0.49	0.32
1975	0.30	0.07	0.01	0.57	0.33	2.69	2.04	6.71	1.22	0.41	0.24	0.17
1976	0.22	0.33	0.44	0.78	1.20	17.33	4.52	2.71	1.55	0.39	0.19	0.16
1977	0.17	0.18	0.30	0.43	0.81	4.47	10.26	3.81	6.13	0.94	0.45	0.21
1978	0.24	1.43	19.61	5.37	5.61	2.60	1.02	4.69	1.93	0.84	0.28	0.30
1979	0.23	0.26	0.62	0.51	1.36	11.30	3.03	7.79	1.34	0.76	0.52	0.50
1980	0.20	0.32	0.35	0.46	0.59	1.58	3.68	21.86	2.94	0.68	0.35	0.22
1981	0.42	0.33	1.37	0.47	1.00	0.66	5.57	3.11	1.49	0.29	0.07	0.02
1982	0.30	0.44	0.55	4.27	9.17	11.06	4.60	2.87	1.17	0.52	0.28	0.20
1983	0.44	0.36	0.42	0.72	2.01	6.24	7.59	6.13	3.90	0.79	0.33	0.26
1984	0.29	0.46	2.03	5.09	4.66	2.26	4.19	1.74	0.77	0.34	0.17	0.16
1985	0.16	0.43	1.68	2.12	15.01	39.67	9.67	3.69	1.01	0.47	0.73	0.16
1986	0.25	1.52	0.47	25.74	22.02	7.11	11.55	4.38	2.54	0.75	0.38	0.31
1987	0.28	0.42	0.39	0.43	1.30	1.36	5.99	1.69	0.72	0.28	0.15	0.11
1988	0.16	0.75	5.04	13.73	12.12	26.92	12.82	12.23	3.22	1.18	0.44	0.27
1989	0.22	0.30	0.43	0.43	0.80	1.05	2.51	0.70	0.29	0.28	0.02	0.00
1990	0.07	0.08	0.20	1.31	0.91	3.78	2.89	1.52	0.88	0.28	0.03	0.02
1991	0.00	0.34	0.26	0.63	4.09	1.37	0.98	0.71	1.61	0.36	0.11	0.41
1992	0.07	0.23	1.59	10.29	9.41	7.69	18.54	9.51	2.84	1.13	0.28	0.16
1993	0.17	1.51	1.27	1.15	1.32	2.18	6.11	19.42	13.07	2.54	0.55	0.22
1994	0.15	0.26	1.33	8.41	19.13	2.43	5.23	2.83	3.03	0.43	0.16	0.08
1995	0.10	0.15	0.18	1.18	3.75	13.95	1.77	1.64	0.54	0.11	0.02	0.04
1996	0.09	0.42	0.40	0.61	14.20	1.95	7.54	1.76	0.69	0.46	0.07	0.08
1997	0.29	0.31	0.32	0.46	1.13	1.11	0.84	0.69	0.23	0.04	0.04	0.22
1998	0.76	0.52	8.01	4.96	7.67	15.94	5.37	3.42	1.48	0.20	0.02	0.01
1999	1.28	0.18	0.39	3.73	3.43	1.68	1.29	0.80	12.74	2.22	0.39	0.20
2000	0.14	0.43	0.34	0.41	3.88	11.04	1.76	1.77	2.04	0.15	0.05	0.04
2001	0.07	0.22	0.17	0.16	0.19	0.45	0.24	0.28	0.09	0.02	0.02	1.64
2002	0.15	0.12	2.32	9.14	36.07	18.47	6.88	27.03	2.73	0.97	0.34	0.17

TD Numéro 9

Vous avez la série des débits moyens journaliers, on vous demande de dessiner le graphique des débits classés, faites ressortir les différents débits caractéristiques.

Jours	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1	0.56	0.7	1.92	2.94	17.35	10.26	6.85	6.33	7.45	1.63	0.84	0.49
2	0.56	0.7	1.92	2.82	12.26	10.47	6.51	7.45	6.68	1.72	0.84	0.56
3	0.56	0.7	2.5	2.82	12.7	10.9	5.83	8.85	6.51	1.72	0.84	0.56
4	0.56	0.63	107.58	2.7	13.66	12.64	5.83	8.45	6.51	1.63	0.84	0.49
5	0.56	0.63	168.8	2.7	12.7	11.01	5.17	8.45	8.59	1.63	0.77	0.49
6	0.56	4.09	39.9	2.94	11.16	10.05	5.99	7.58	8.33	1.53	0.77	0.49
7	0.56	1.88	29.62	2.94	10.5	10.1	5.83	6.51	5.5	1.53	0.77	0.49
8	0.56	1.16	60.53	3.19	10.43	9.57	5.83	15.63	4.72	1.34	0.77	0.49
9	0.56	1.07	37.2	3.19	12.68	10.11	5.17	14.03	4.28	1.34	0.77	0.49
10	0.56	0.98	24.19	2.94	16.66	10.37	5.47	15.04	3.99	1.34	0.77	0.49
11	0.56	0.98	10.4	2.94	25.05	10.39	5.17	10.34	3.99	1.25	0.77	0.49
12	0.56	0.91	10.13	2.94	30.25	38.2	5.83	8.25	3.99	1.25	0.7	0.49
13	0.56	0.84	8.85	2.94	16	15.58	5.66	6.68	3.71	1.25	0.7	0.49
14	0.56	0.77	7.45	2.94	11.34	12.27	5.66	29.97	3.58	1.43	0.7	0.49
15	0.56	0.93	6.51	2.7	22.27	10.45	5.83	51.75	3.32	1.43	0.7	0.49
16	0.56	1.73	5.83	2.46	32.5	9.25	5.83	11.01	3.45	1.82	0.7	0.49
17	0.56	1.25	5.17	2.46	10.48	87.75	5.83	10.27	3.99	1.53	0.7	0.49
18	0.56	0.98	5.17	2.46	10.45	90.82	5.5	10.25	3.85	1.43	0.7	0.49
19	0.56	0.91	5.5	2.46	10.43	20.1	6.16	9.5	3.32	1.34	0.63	0.56
20	0.56	0.84	5.02	2.35	10.39	13.66	7.25	8.45	3.06	1.34	0.63	0.63
21	0.49	0.84	4.87	2.35	10.32	20.1	7.25	7.25	2.94	1.16	0.63	0.7
22	0.49	9.5	6.08	2.46	10.25	13.66	55.06	6.85	2.94	1.07	0.63	0.77
23	0.49	10.29	5.95	2.35	10.13	11.82	14.05	6.44	2.94	1.43	0.63	0.84
24	0.49	4.79	5.17	2.46	10	10.48	6.51	8.85	2.82	1.63	0.63	0.84
25	0.49	4.57	5.17	4.12	9.75	10.25	9.05	8.85	2.46	1.16	0.63	0.84
26	0.49	6.93	4.57	3.61	8.05	9.5	8.05	8.45	2.35	1.16	0.63	0.84
27	0.49	3.71	3.85	2.7	7.45	8.45	6.51	8.85	2.24	1.16	0.63	0.91
28	0.49	2.7	3.58	2.7	21.31	7.65	95.84	7.45	2.24	0.98	0.56	0.91
29	0.63	1.92	3.32	7.2	18.67		21.82	6.85	2.24	0.91	0.56	0.91
30	0.63	2.12	3.19	38.85	16.4		10.24	6.85	2.03	0.91	0.49	0.91
31		3.21		64.15	11.28		7.65		1.72		0.49	0.91