

HYDRAULIQUE APPLIQUEE

03 TRAVAUX PUBLICS

Objectifs de l'enseignement:

Enseigner les bases fondamentales de l'hydraulique des écoulements de surface, l'influence des écoulements sur les ouvrages de travaux publics, et d'initier l'étudiant aux règles de dimensionnement et de gestion des réseaux d'assainissement.

Mode d'évaluation: Examen: 100%.

Semestre: 6

Unité d'enseignement: UED 3.2

Matière 2:Hydraulique appliquée

VHS: 22h30 (**Cours:** 1h30)

Crédits: 1

Coefficient: 1

ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE

On considère un écoulement de liquide (eau) dans un canal de grande longueur devant les dimensions transversales de la section droite prismatique et dont les parois sont de même nature sur la longueur. La pression est uniforme sur la surface libre (pression atmosphérique). L'écoulement peut être varié dans le sens de l'écoulement et on supposera qu'il est toujours turbulent. Dans un écoulement réel, les parois ne sont pas planes et leurs irrégularités à grande échelle induisent alors des faibles courants secondaires superposés à l'écoulement principal qui sera l'écoulement débitant du mouvement unidirectionnel pris en compte. On admettra, en première approximation, que la vitesse est uniforme dans une même section et égale à la vitesse débitante, lorsque le canal est large, le point de vitesse maximale est situé plus près de la surface que si le canal est étroit.

Classification des écoulements

Écoulement laminaire et écoulement turbulent

- Suivant les vitesses et les géométries d'écoulements, le transport de la quantité de mouvement d'un fluide peut être dominé par des phénomènes diffusifs ou convectifs ; On a alors des écoulements de structure différente. La vie courante donne de nombreux exemples de la diversité de ces derniers : il y a de très grandes différences entre l'écoulement perpétuellement changeant d'une rivière dans un rapide (écoulement « turbulent ») et celui très stable d'une huile visqueuse (écoulement « laminaire »). Il existe aussi des cas

intermédiaires où l'écoulement n'est turbulent que par intermittence ou bien encore varie en fonction du temps mais de façon périodique et bien visible. Ainsi en est-il de l'écoulement de l'air derrière un fil téléphonique (« le fil qui chante ») ou derrière un pont suspendu ; si celui-ci a été mal conçu, il peut entrer en résonance à la fréquence d'oscillation de l'écoulement et se briser, comme ce fut le cas pour le pont de Tacoma aux USA.

- Un simple robinet d'évier peut permettre d'observer tous ces phénomènes :

- à des débits faibles mais cependant continus, l'écoulement est très stable ; les lignes de courant sont disposées régulièrement les unes par rapport aux autres et on qualifie ces écoulements de laminaires.

- En augmentant le débit, on obtient un écoulement instable dans lequel, à une certaine distance du robinet, des gouttes sont émises de façon périodique.

- En augmentant encore la vitesse, on peut obtenir un régime où il existe une alternance régulière de grosses et de petites gouttes. On a alors division de la fréquence d'émission par 2. Une expérience soignée a permis de suivre cette division de fréquence par 4, 8, ... jusqu'à un débit seuil au-dessus duquel l'écoulement devient chaotique. La turbulence peut aussi se manifester par l'apparition de zones où l'écoulement est irrégulier : celles-ci sont facilement visibles car elles perturbent le contour du jet, et leur taille augmente au fur et à mesure qu'elles se déplacent vers l'aval. Cette notion d'intermittence est cruciale dans l'analyse de la turbulence. La fraction du temps où ces bouffées sont présentes augmente avec le débit.

- Pour finir, l'écoulement devient complètement turbulent et sa vitesse fluctue en permanence.

- La nature du fluide joue également un rôle important. Ainsi, à débit équivalent, la vidange d'un moteur d'automobile par le trou inférieur du carter donne un jet vertical d'huile parfaitement stable et cylindrique ; la vidange d'une cuve d'eau donnerait au contraire un jet turbulent d'où se détacheraient de nombreuses gouttelettes. On voit se manifester l'influence de la viscosité (plus précisément, du nombre de Reynolds) : ainsi, l'apparition de la turbulence est retardée pour l'huile qui est plus visqueuse que l'eau.

- Une autre expérience possible : on considère un cylindre de diamètre d , aligné le long de l'axe Oz et placé dans un écoulement de vitesse U suivant la direction Ox , perpendiculaire à son axe. On observe les différents types d'écoulements possibles. Les images ont été obtenues en éclairant le cylindre par une nappe de lumière perpendiculaire à son axe, lequel est perpendiculaire au plan des photos. Dans la pratique on utilise un bac rempli d'une couche de quelques centimètres d'eau avec, en suspension, des fines particules allongées ; ces particules s'alignent dans l'écoulement et réfléchissent la lumière de manière anisotrope. En déplaçant

dans le liquide une baguette cylindrique verticale de quelques millimètres de diamètre, on observe les différents régimes. On distingue les régimes d'écoulement suivants :

— Aux faibles vitesses, l'écoulement est laminaire et parfaitement symétrique entre l'amont et l'aval du cylindre. Cette caractéristique découle de la réversibilité de ce type d'écoulements : lorsqu'on inverse le sens de la vitesse, les lignes de courant restent inchangées.

— Pour des vitesses plus importantes, on observe deux tourbillons contrarotatifs fixes en aval de la sphère (écoulement de recirculation).

— Si la vitesse augmente encore, l'écoulement cesse d'être stationnaire et la vitesse du fluide dépend explicitement du temps : des tourbillons sont émis périodiquement en aval de l'écoulement. Ils forment une double rangée de tourbillons appelée allée de Bénard-Von Karman; ce type de structure peut être observée dans des écoulements océanographiques derrière des îles, ou atmosphériques derrière des obstacles de grande longueur comme dans « le fil qui chante » ou dans la harpe éolienne : un fil tendu dans un écoulement d'air entre en résonance avec l'émission périodique de tourbillons (simulation).

ÉCOULEMENT UNIFORME

Un écoulement est considéré comme étant uniforme lorsque ses caractéristiques sont invariables dans le temps et dans l'espace. Ces caractéristiques sont la profondeur h ou y de l'écoulement appelée aussi profondeur normale, l'aire de la section mouillée A , la vitesse V de l'écoulement et le débit Q . La ligne de charge totale est à la fois parallèle à la ligne piézométrique et à la pente géométrique du canal. D'un point de vue pratique, la constance de la vitesse V est généralement associée à la constance de la vitesse moyenne de l'écoulement; mais de façon plus rigoureuse, cela signifie que l'écoulement est caractérisé par une vitesse constante en tout point de son domaine. En d'autres termes, la distribution des vitesses dans chacune des sections transversales de l'écoulement est uniforme, correspondant à une couche limite pleinement développée. Bien que la condition d'un écoulement uniforme, dans le sens strict du terme, ne soit pratiquement jamais satisfaite, elle est cependant fréquemment admise lors du calcul des caractéristiques d'un écoulement en canaux et rivières. Cette approche, bien que simplifiée, donne des résultats assez satisfaisants dans bon nombre de cas pratiques. L'écoulement uniforme peut être soit en régime laminaire soit en régime turbulent, mais il se produit sous de grandes vitesses. A vitesse élevée, l'écoulement uniforme est instable et il est le siège d'un fort entraînement d'air. Dans les canaux ouverts, l'écoulement uniforme se développe lorsque les forces de résistance s'opposant à l'écoulement sont

équilibrées par les forces de gravité. Les forces de résistances sont proportionnelles à V^2 . Lorsqu'un écoulement entrant dans un canal s'effectue de façon lente, la vitesse et par conséquent la résistance à l'écoulement sont faibles. Les forces de gravité sont alors prédominantes et l'écoulement subit alors une accélération depuis l'amont. La vitesse ainsi que la résistance augmentent au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval, jusqu'à ce que les forces de gravité soient équilibrées. A cet instant, l'écoulement uniforme apparaît. La zone sur laquelle s'étend l'écoulement accéléré, et au-delà de laquelle l'écoulement uniforme apparaît, est dite zone de transition. Si la longueur du canal est inférieure à la longueur de la zone transitoire, l'écoulement uniforme ne peut être atteint. Plus à l'aval de l'écoulement uniforme, les forces de gravité deviennent de plus en plus prédominantes en raison de l'accélération que subit l'écoulement. L'écoulement uniforme disparaît alors en laissant place à un écoulement varié.

Écoulement graduellement varié

Cet écoulement se produit sur une certaine longueur adjacente au bord aval du canal. Ailleurs, l'écoulement est uniforme. Avant de commencer l'analyse, rappelons que les résultats expérimentaux d'Ayadi montrent qu'il est indispensable de redéfinir la hauteur critique et le nombre de Froude de l'hydraulique classique. D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle nous avons donné dans ce travail une importance particulière à la proposition de Piau (1996) en rapport avec le modèle d'Herschel-Bulkley. Pour une meilleure interprétation des résultats, on indique dans le Tableau 5 certaines hauteurs catéchistiques de l'écoulement qui sont indispensables dans ce problème. h_b désigne la profondeur de l'écoulement à l'endroit du jet. Un point intéressant à signaler est que h_c ne correspond pas toujours à h_b . En plus, il n'existe pas a priori une relation directe entre ces deux profondeurs. Il se peut que dans le cas général, h_b dépend aussi de la nature du jet à l'endroit de la chute (écoulement collé ou aéré).

Transport solide en hydraulique Fluviale

Une rivière transporte des matériaux granulaires qui proviennent soit du bassin versant soit du fond ou des berges du lit mineur.

Les matériaux du bassin versant peuvent provenir de l'ensemble de sa surface sous l'effet du vent, de la pluie, de la fonte des neiges et des cycles gel-dégel. Ce mode d'érosion est dit aréolaire (par opposition à linéaire) et se produit soit en nappes soit en rigoles. Une partie seulement du produit de cette érosion aréolaire parvient au réseau hydrographique. Les

particules produites et transportées sont fines et souvent cohésives. Dans les bassins versants montagnards, des formes d'érosions ou de transports plus localisés peuvent produire brutalement de grandes masses de matériaux. Ce sont les glissements de terrain, les avalanches, les laves torrentielles.

L'érosion du fond du lit ou des berges est dite linéaire. Elle persiste même lorsque la pluie cesse. Elle met en oeuvre des forces plus considérables que l'érosion aréolaire et peut donc mobiliser des matériaux nettement plus grossiers.

Nous appellerons transport solide le transport de matériaux granulaires (matériaux alluvionnaires ou

autres matériaux granulaires apportés à la rivière). Mais les cours d'eau transportent aussi d'autres matériaux solides et tout particulièrement les arbres arrachés aux berges ou au lit majeur et la glace.

En toute rigueur, il faudrait ici parler de transport granulaire. Mais nous garderons l'appellation « transport solide » qui est d'emploi plus courant. Cette remarque vaut aussi pour l'appellation « débit solide ».

HYDRAULIQUE FLUVIALE ET HYDRAULIQUE TORRENTIELLE

Nous ferons notre la définition des rivières et des torrents donnée par Bernard en 1925:

- les rivières ont une pente inférieure à 1% ;
- les rivières torrentielles ont une pente comprise entre 1 et 6% ;
- les torrents ont une pente supérieure à 6%.

L'hydraulique fluviale concerne les rivières ou les rivières torrentielles et l'hydraulique torrentielle, qui n'est pas l'objet de ce cours, concerne les torrents. En hydraulique fluviale, nous pouvons considérer indépendamment la phase liquide et la phase solide, certes en tenant compte de l'évolution de la topographie due au transport solide. Ce n'est qu'une approximation, mais elle ne conduit pas à de grandes erreurs. Toutefois, il faudra tenir compte, comme nous le verrons, des modifications du fond en fonction de l'importance du débit liquide, ce qui entraîne en particulier une évolution du coefficient de rugosité. Cette approche est dite découplée. Par contre en hydraulique torrentielle, la présence de la phase solide perturbe fortement l'écoulement liquide. Selon Smart et Jaeggi (1983) cité par D. Richard dans, au-delà d'une pente de 6 à 10 %, la hauteur d'écoulement est significativement supérieure à ce qu'elle serait en présence d'eau seule. De plus dans la même gamme de pentes,

nous ne pouvons plus considérer que le fluide a un comportement newtonien. Enfin, certains torrents peuvent être le siège d'événements exceptionnels

appelés laves torrentielles, mélanges de boue et de pierres pouvant parcourir de grandes distances et atteindre des hauteurs bien supérieures à ce que produirait une crue "liquide". Les transports solides très spectaculaires des torrents de montagne et les laves torrentielles ne seront pas traités dans ce cours consacré à l'hydraulique fluviale.

Attention aux confusions de vocabulaire ! Lorsque nous parlons de rivière torrentielle, cela ne présuppose rien sur le type d'écoulement, fluvial ou torrentiel, tel que défini au chapitre 1 à partir du nombre de Froude. En rivière torrentielle, l'écoulement est plutôt de type fluvial, avec des passages torrentiels au droit des seuils naturels ou des cascades. A l'inverse, en rivière non torrentielle (c'est à dire rivière de plaine ou fleuve), l'écoulement torrentiel est rare mais peut survenir sur certains tronçons. Mieux vaudrait d'ailleurs parler comme les Anglo-saxons d'écoulement subcritique au lieu de fluvial et supercritique au lieu de torrentiel.

CHARRIAGE ET SUSPENSION DES MATÉRIAUX NON COHÉRENTS

Considérons un cours d'eau qui coule sur des alluvions de taille à peu près identique. Pour les faibles vitesses, rien ne se passe au fond du cours d'eau : les matériaux solides restent au repos. Pour les vitesses plus élevées, les matériaux solides se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs : ce phénomène est appelé charriage. Les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau, moins d'un mètre par heure. Pour des vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond sont emportés par le courant : le phénomène est appelé transport en suspension. Les grains se déplacent à la vitesse de l'eau au voisinage du grain. Passons maintenant à une rivière dont le fond et les berges sont constitués de matériaux de tailles

différentes : par exemple des sables fins, des graviers et des galets. Pour une vitesse donnée, il y a simultanément transport par charriage des matériaux les plus lourds et transport en suspension des matériaux plus légers. Lorsque la vitesse augmente, les matériaux qui étaient simplement charriés sont à leur tour mis en suspension. Dans les rivières à graviers, le transport solide se fait essentiellement par charriage ; mais dans les rivières à sable, le transport par suspension peut constituer la quasi-totalité du transport.

Le charriage est le mouvement des grains près du fond par roulement ou glissement des grains les uns sur les autres ou par petits sauts. Le charriage est un déplacement mais bien sûr pour qu'il y ait déplacement il faut qu'il y ait d'abord arrachement du grain. Ces déplacements sont

dus à la traînée et à la portance³. Selon les conditions, la rivière adopte un fond plat ou un fond ondulé. Ce n'est que lorsque la turbulence de l'écoulement devient forte que le grain est susceptible d'être emporté par suspension malgré son poids. Il peut alors se déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond. Un grain déjà mis en mouvement par charriage passe en suspension lorsque la composante de la vitesse turbulente est supérieure à sa vitesse de chute. Le charriage concerne plus particulièrement les sables, graviers, galets et blocs. La suspension concerne plus particulièrement les sables, les limons et les argiles.

Ceci dit, la limite précise entre charriage et suspension reste un peu imprécise : il y a une certaine continuité entre les deux mécanismes comme schématisé.

Par la suite, les matériaux en suspension considérés seront les matériaux provenant du lit et en interaction avec lui. Les matériaux fins provenant du bassin versant sont transportés en autosuspension et n'interagissent pas avec le lit mineur. Pour cette raison, il n'est pas nécessaire de les étudier ici. Par contre ces matériaux fins se déposent dans le lit majeur lors des décrues. Les Anglo-saxons distinguent le « bed load » pour le transport solide en interaction avec le lit et le « wash load » pour la suspension sans interaction.

L'observation du fond des lits des rivières à sable, montre que le transport des matériaux peut se faire de la manière suivante au fur et à mesure que le débit augmente :

- par charriage sur fond plat ;
- par charriage sur dunes : les dunes ont un profil semblable à celles du désert : elles ont un front amont à faible pente et un front aval raide et elles avancent lentement vers l'aval ; leur hauteur est inférieure au tiers du tirant d'eau ; leur espacement est de 4 à 8 fois le tirant d'eau ;
- par suspension et dunes ;
- par suspension sur fond plat (les dunes ayant été effacées) ;
- pour certains fleuves à fort tirant d'eau, par suspension intense sur antidunes (sortes de dunes à profil relativement symétrique qui se propagent vers l'amont 4) ; le régime est torrentiel ;
- et, dans le cas de matériaux fins de diamètre inférieur à 0,5 à 0,8 mm, par rides (sortes de minidunes hautes de moins de 4 cm).

ÉROSION DU FOND, DÉPÔT

Dans une rivière naturelle, l'écoulement n'est jamais uniforme soit parce que des paramètres

géométriques changent (pente, largeur...), soit parce qu'il y a des singularités (méandres, seuils). Il y a donc des zones à plus forte vitesse et des zones à plus faible vitesse.

Dans les zones à forte vitesse, il y a davantage de matériaux prélevés : ce sont des zones d'érosion du fond. Dans les zones à faible vitesse, les matériaux provenant de l'amont peuvent se déposer à nouveau : ce sont des zones de dépôt. Les dépôts prennent la forme de bancs (ou plages ou grèves) ou d'îles.

Une rivière naturelle présente donc une double variabilité de son lit :

- dans l'espace : il y a des zones privilégiées d'érosion, et des zones privilégiées de dépôt ;
- dans le temps : des matériaux fins déposés en régime moyen pourront être emportés en crue.

Erosion du fond et dépôts sont des conséquences de l'évolution des débits au sein du cycle hydrologique annuel. Ils traduisent une variabilité naturelle à court terme des conditions d'écoulement et de transport que l'on compare souvent à une respiration. En ce sens, ces modifications sont plutôt de type réversible : le dépôt est repris en crue puis se reconstitue à la décrue à peu près au même endroit. La respiration est un mouvement réversible du fond autour d'une valeur moyenne.

En raisonnant maintenant sur une longue période, (de un à cent ans par exemple), des évolutions naturelles (climatiques) ou anthropiques (reboisement du bassin versant) peuvent provoquer des dérives du fond moyen. Le cours d'eau s'adapte progressivement par une tendance générale à l'érosion du fond ou aux dépôts.

SATURATION EN DÉBIT SOLIDE

Le débit solide est le volume de matériaux granulaires transportés par le courant par unité de temps. Il s'exprime en m^3/s . Pour une vitesse donnée, le cours d'eau a une capacité de transport solide, liée à l'énergie de l'eau. Le cours d'eau transporte toujours autant de matériaux qu'il est capable d'en transporter, à condition bien sûr que ces matériaux soient disponibles sur place, c'est-à-dire sur le fond ou sur les berges. A chaque instant, l'écoulement est donc saturé en débit solide (charriage et suspension). Dans cette situation, le tronçon de rivière considéré est en équilibre et le débit solide entrant est égal au débit solide sortant. On dit aussi que le taux d'érosion est égal au taux de dépôts. Si le débit solide sortant est inférieur, il y a dépôt dans le tronçon considéré ; si le débit solide sortant est supérieur, il y a érosion du fond ou des berges dans le tronçon considéré. Pour un tronçon de rivière qui ne serait pas saturé en débit solide, l'expérience et la théorie montrent que lorsque le charriage est prédominant, la distance nécessaire pour le retour à la saturation est faible, quelques dizaines

de mètres. Par contre, lorsque la suspension prédomine, l'inertie est plus grande et la distance nécessaire est importante, quelques kilomètres.

Assainissement routier(03 Année TP)Semestre 06

Introduction :

L'hydraulique routière couvre le rétablissement des écoulements naturels, l'assainissement des plateformes de chaussée, le drainage et la lutte contre la pollution routière. La recommandation sur l'assainissement routier des dernières années a essentiellement traité des deux premiers domaines. La collection des guides « L'eau et la route » traite de la protection des ressources en eau et des milieux aquatiques dans le cadre des infrastructures routières.

Conception technique des ouvrages :

L'assainissement routier concerne les volets suivants :

- le rétablissement des écoulements naturels ;
- la collecte et l'évacuation des eaux superficielles dans l'emprise de la route ;
- la collecte et l'évacuation des eaux internes c'est-à-dire le drainage ;
- la lutte contre la pollution routière.

Rétablissement des écoulements naturels (bassins versants < 100 km²) :

Le rétablissement des écoulements naturels consiste à assurer la continuité des écoulements superficiels des bassins versants interceptés par la route. Ce rétablissement doit être adapté aux enjeux (inondation, érosions ou atterrissements, pérennité de l'infrastructure, sécurité des usagers et respect du milieu aquatique) qu'il convient d'identifier et doit être conçu dans le respect des réglementations en vigueur. La route peut constituer un obstacle préjudiciable à l'écoulement naturel et réciproquement, celui-ci peut générer des dommages à la route. Les ouvrages hydrauliques de rétablissement des écoulements naturels devront donc être correctement dimensionnés pour limiter les risques :

- d'inondation et de submersion ou de dégradation de la route dans des seuils admissibles ;
- d'inondation en amont de la voie ;
- de rupture de l'ouvrage routier. On peut distinguer trois cas d'interaction entre un cours d'eau et la route :
- l'empiètement du tracé dans le champ d'inondation (lit majeur) d'un cours d'eau important. Une étude spécifique est nécessaire, qui déborde du cadre du présent document.
- le franchissement d'un cours d'eau important, ou qui pose des problèmes hydrauliques spécifiques. Là encore, une étude faite par un spécialiste s'impose.

- le franchissement de cours d'eau dont la superficie du bassin versant n'excède pas une centaine de kilomètres carrés, sans enjeu particulier, qui fait l'objet du présent chapitre. Au-delà de ce seuil, l'étude nécessite l'intervention de spécialistes en matière d'hydrologie, d'hydraulique et d'hydro géomorphologie.

Éléments de doctrine :

Le rétablissement hydraulique des écoulements naturels constitue l'une des contraintes fortes des projets routiers notamment sur le profil en long. En conséquence, il importe de s'en préoccuper dès le stade des études d'Avant-projet Sommaire (APS). Outre l'aspect réglementaire qui est à vérifier, les différentes étapes pour déterminer l'ouvrage hydraulique à mettre en place sont :

- l'estimation du débit de projet en fonction d'une période de retour et d'un débit exceptionnel ;
- le dimensionnement, le choix et le calage de l'ouvrage hydraulique (contrôles de la hauteur d'eau amont, des vitesses d'écoulement, du tirant d'air, de l'impact hydraulique et de la prise en compte s'il y a lieu de la libre circulation de la faune piscicole).

Hauteur d'eau amont* (H_{AM}) et vitesse d'écoulement (V_e) dans les ouvrages hydrauliques :

Le niveau de la hauteur d'eau amont doit être compatible avec le calage altimétrique de l'infrastructure et l'aléa inondation. Dans tous les cas, la hauteur d'eau amont* ne doit pas excéder 1,2 fois la hauteur de l'ouvrage pour le débit de projet, pour les ouvrages d'ouverture ≤ 2 m. Les vitesses doivent respecter les critères suivants vis-à-vis de la durabilité des ouvrages :

- ouvrages en béton : ≤ 4 m/s ;
- ouvrages métalliques : $\leq 2,5$ m/s.

Les vitesses les plus faibles doivent être vérifiées (vitesse approximative de 1m/s). En cas d'impossibilité de satisfaire à ces conditions, il conviendra de prévoir des dispositifs de protection.

Impact de l'ouvrage hydraulique :

L'exhaussement de la ligne d'eau en amont de l'ouvrage hydraulique par rapport à la situation existante et la vitesse d'écoulement en sortie d'ouvrage sont à apprécier en fonction des enjeux locaux. L'écoulement à surface libre dans l'ouvrage hydraulique doit être assuré pour le débit de projet.

Implantation de l'ouvrage hydraulique :

En plan, l'ouvrage hydraulique est généralement implanté dans l'axe du lit mineur du cours d'eau ; son ouverture doit être égale au moins à celui du lit mineur. Il peut néanmoins être nécessaire de rectifier le tracé naturel de l'écoulement sous l'infrastructure pour réaliser une traversée plus directe. Il s'agit de s'assurer de sa faisabilité tant sur le plan environnemental que réglementaire. La continuité de l'écoulement hydraulique doit être respectée et les zones sensibles à l'érosion doivent faire l'objet de protection. En profil en long, le calage de l'ouvrage hydraulique de traversée est fortement conditionné par la topographie du terrain naturel et des conditions d'écoulement (pente du lit). Dans la mesure du possible, l'ouvrage hydraulique devra être calé suivant la pente du lit naturel du cours d'eau.

Conception des ouvrages hydrauliques :

On distingue généralement 5 familles d'ouvrages : les buses circulaires, les dalots*, les buses arches*, les ouvrages à voûte cintrée, et les ouvrages d'art. Dans la mesure du possible, les produits industrialisés seront à rechercher plutôt que des ouvrages coulés en place plus coûteux. Les ouvrages en béton armé, sous réserve de dispositions constructives soignées, présentent d'excellentes garanties de solidité et de longévité. L'étude structurelle des ouvrages projetés relève d'un bureau d'études spécialisé en ouvrage d'art.

Facteurs influençant le choix des ouvrages hydrauliques :

Le choix des ouvrages est guidé par le souci permanent de la pérennité de la route, de la sécurité des usagers, du coût d'investissement et des modalités d'entretien ultérieur de l'ouvrage. Les facteurs influençant le choix sont :

- l'importance du débit à évacuer qui fixe la section d'écoulement et le type de l'ouvrage ;
- les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage : coefficient de rugosité, coefficient d'entonnement créant une perte de charge à l'entrée, forme de la section d'écoulement ;
- la largeur du lit. Un ouvrage unique adapté au débit à évacuer et à la largeur du lit du cours d'eau est généralement préférable à des ouvrages multiples qui augmentent les pertes de charges et rendent plus difficile le passage des corps flottants ;
- la hauteur disponible entre la cote du projet et le fond du talweg ;
- les charges statiques et dynamiques qui sollicitent l'ouvrage hydraulique ;
- les conditions de fondation des ouvrages ;
- la rapidité et la facilité de mise en œuvre : les produits industrialisés approvisionnés en éléments transportables et montés sur place peuvent constituer une solution intéressante pour réduire les délais d'exécution et dans le cas où l'accès au chantier est difficile ;
- La résistance aux agents chimiques ;

- la résistance au choc : les ouvrages massifs résistent mieux aux chocs et à l'abrasion par le charriage de matériaux solides.

Protections des ouvrages hydrauliques :

Il peut être envisagé de caler le radier de l'ouvrage hydraulique à au moins 0,30 m sous le fond du lit du cours d'eau pour permettre la reconstitution d'un fond naturel dans l'ouvrage (remontée de poissons). La surélévation du niveau amont des écoulements et l'accroissement des vitesses en sortie d'ouvrage nécessitent le plus souvent des protections en amont et en aval des ouvrages. Toute rectification du tracé nécessitera :

- la continuité de l'écoulement hydraulique ;
- la protection efficace des berges aux changements de direction par des techniques pérennes relevant prioritairement du génie végétal « Protection des berges de cours d'eau en techniques végétales ». Les techniques de renforcement par enrochements et gabions devront être réservées aux sections fortement sollicitées par la vitesse de l'écoulement, si les enjeux sont importants en terme de sécurité des personnes et des biens à fortes valeurs ajoutées ;
- les écoulements en pente importante $p = 4\%$ posent des problèmes spécifiques (détermination de la hauteur d'eau amont, vitesse dans les ouvrages...) qui ne sont pas traités dans ce guide.

Entretien et exploitation des ouvrages hydrauliques :

L'accès aux ouvrages hydrauliques doit tenir compte des contraintes d'exploitation. Une visite annuelle et une visite après une crue sont nécessaires pour prévoir, le cas échéant des travaux d'entretien de l'ouvrage et l'évacuation des différents atterrissements. Le diamètre minimal des ouvrages hydrauliques sous autoroutes est de 800 mm. Cette dimension devra, dans tous les cas, être compatible avec les capacités d'entretien du gestionnaire. Pour les routes à 2 ou 3 voies, ce diamètre pourra être réduit à 600 mm tout en garantissant également les conditions d'exploitation.

Assainissement de la plate-forme :

Il s'agit de la collecte et de l'évacuation des eaux superficielles dans l'emprise de la route. Composante essentielle du projet routier, l'assainissement de la plate-forme vise trois objectifs :

- la sécurité des usagers, en évacuant l'eau des chaussées et des talus ;
- la pérennité de l'infrastructure, en collectant les eaux et en les évacuant de la route ;
- la lutte contre la pollution routière. Un réseau mal conçu induira des désordres de surface (débordements des ouvrages, inondations...), des désordres structurels importants de la chaussée sur le moyen terme. Ces situations sont des facteurs aggravants pour la sécurité des

usagers et l'intégrité de la route. Par ailleurs, tout écoulement routier transféré hors plateforme n'est pas neutre pour l'environnement.

En matière de conception routière :

- en profil rasant, le profil en long de la plate-forme doit être calé telles que les structures de chaussée et de couche de forme soient en remblai et que les rejets de plate-forme puissent être évacués gravitairement dans l'ouvrage d'assainissement ;
- éviter les pentes inférieures à 0,5 % car elles entraînent des risques de stagnation d'eau au changement de dévers ;
- éviter les zones en déblais profonds (tranchées). Il s'agit souvent de point critique à assainir et de secteur parfois soumis aux rabattements des nappes ;
- proscrire les points bas en déblais.

En matière d'assainissement :

- respecter les critères d'implantation des ouvrages au regard des règles de sécurité des usagers;
- adapter l'étanchéité des ouvrages de collecte aux enjeux de protection de la ressource en eaux;
- équiper les crêtes de talus de déblai d'ouvrages longitudinaux dans le cas de ruissellement de bassin versant naturel (érosion de talus et surcharge hydraulique du réseau de pied de talus) ;
- proscrire les stations de pompage (poste de refoulement et poste de relèvement), sauf cas exceptionnels (installations coûteuses, entretien et exploitation complexes) ;
- rechercher toujours à faire circuler l'eau gravitairement et superficiellement ;
- multiplier les points de rejets si possible, pour éviter les concentrations des débits à pondérer avec les enjeux environnementaux ;
- étudier les possibilités d'écêtement d'infiltrations (si c'est cohérent avec la protection de la ressource en eau) et des débits à l'aval (noues, bassins de retenue intermédiaires, etc.) ;
- dimensionner les réseaux au moins pour la pluie d'occurrence décennale ($T = 10$ ans) ;
- vérifier que la chaussée ne soit pas submergée pour une période de retour de 25 ans ; a contrario, on pourra admettre celle de l'accotement pour $T = 25$ ans ;
- éviter de déverser dans les réseaux de la plate-forme routière, les eaux issues des bassins versants naturels ou des nappes ;
- prévoir un ouvrage revêtu si la pente est ≤ 1 % ou si la vitesse de l'écoulement est susceptible d'entraîner une érosion (la pente critique est souvent de l'ordre de 3,5 %) ;

- dans les régions soumises au gel, préférer des ouvrages bétonnés aux ouvrages maçonnés ;
- les ouvrages engazonnés ralentissant les transferts de débits à l'aval, sont propices à l'infiltration et favorisent l'abattement de la pollution.

Nature et fonction des réseaux :

Le réseau d'assainissement doit collecter les eaux de ruissellement provenant des bassins versants routiers et des talus pour les évacuer vers des exutoires. Son architecture se développe principalement tout le long de l'infrastructure suivant une logique hydraulique gravitaire (entre un point haut et un point bas) par assemblage d'ouvrages élémentaires (linéaires ou ponctuels, enterrés ou superficiels). Les réseaux de plate-forme, ont la spécificité d'être principalement des réseaux linéaires parallèles à l'axe de la route, (distinguer cependant les réseaux hors plate-forme des réseaux situés sur la plate-forme).

L'architecture d'un réseau d'assainissement peut être décomposée conventionnellement en 5 grandes parties : Les réseaux de collecte longitudinaux, les ouvrages transversaux, les ouvrages de raccordement, les ouvrages de contenance et de dépollution et les exutoires.

Réseaux de collecte longitudinaux

Réseau de crête de talus de déblai :

Le rôle du réseau de crête de talus de déblai est d'éviter l'érosion du talus et d'alimenter en écoulement le réseau de pied de talus. Généralement cet ouvrage est revêtu pour éviter son érosion et les infiltrations susceptibles de compromettre la stabilité du talus. Il intercepte les eaux de ruissellement du bassin versant naturel modifié par le tracé routier. Il sera implanté en retrait (1 à 2 m) par rapport à la crête du talus. Cet ouvrage devra être dimensionné en capacité suffisante par tronçon homogène. Il convient de prévoir les aménagements nécessaires à son entretien.

Réseau de pied de talus de déblai :

Ce réseau a pour fonction de collecter les eaux issues du ruissellement du talus de déblai, de la chaussée, de la bande d'arrêt d'urgence et de la berme. En règle générale et en section courante, une cunette* de faible profondeur est réalisée enherbée ou revêtue en fonction des contraintes (pente). De par sa conception, la cunette ne doit pas remettre en cause la sécurité des usagers. Son degré d'étanchéité doit être compatible avec le niveau de protection de la ressource en eau. A intervalle régulier, la cunette doit être raccordée à un collecteur enterré. Ce dernier pourra servir à récupérer, via les regards, les eaux claires de drainage. Un dimensionnement hydraulique s'avère indispensable. Suivant l'importance de l'impluvium constitué par le talus un double réseau peut être envisagé :

- un réseau récupérant uniquement les eaux de talus avec rejet direct dans l'exutoire ;

- un réseau regroupant les écoulements de chaussée et débouchant dans un dispositif de traitement avant rejet à l'exutoire.

Réseau du Terre-plein Central (TPC) :

Le réseau du TPC a pour fonction de collecter et d'évacuer les eaux issues du TPC et de la demi-chaussée déversée. Bien que non circulée, cette partie de la plate-forme doit faire l'objet d'un traitement soigné afin d'éviter le ruissellement des eaux de la chaussée haute vers la chaussée basse (risques d'aquaplanage) et pour protéger la chaussée des infiltrations.

Réseau de pied de talus de remblai :

Situé au niveau du terrain naturel, ce réseau doit collecter toutes les eaux de l'impluvium routier, gravitairement, pour les diriger vers l'exutoire sans préjudice pour les fonds inférieurs. Sur certains tracés, ce réseau intercepte également les eaux de ruissellement d'un bassin versant naturel pour les diriger vers des ouvrages de traversée. Cette branche du réseau permet également de protéger le pied de talus du remblai contre l'érosion. L'ouvrage est généralement un fossé trapézoïdal enherbé à forte capacité hydraulique, ou un fossé revêtu lorsque des risques d'érosion sont à craindre (la pente critique est souvent de l'ordre de 3,5 %).

Ouvrages transversaux :

On classe sous cette rubrique les ouvrages assurant un transfert des écoulements d'un réseau longitudinal vers un autre. Classiquement cette famille d'ouvrages intègre les ouvrages superficiels comme les descentes d'eau tuilées et les traversées sous-chaussée (collecteurs enterrés). L'implantation est subordonnée à l'examen des points suivants : la géométrie de la route, le sens des écoulements (de la plate-forme et des bassins versants naturels associés), les débits transportés, et la position des exutoires.

Quelques règles à appliquer :

- les eaux d'un talus de déblai doivent, dès que possible, être rejetées hors plate-forme via une traversée sous la chaussée ;
- lorsque l'infrastructure comporte un TPC, prévoir pour la traversée un regard de visite dans le terreplein central ;
- préférer les descentes d'eau tuilées à une canalisation (risques importants d'obstruction) ;
- le pied des descentes d'eau tuilées sera aménagé au raccordement avec le fossé pour éviter l'érosion (forme de béton).

Ouvrages de raccordement :

Il s'agit des regards et des différents raccordements des liaisons transversales avec le réseau longitudinal ; de leur bonne exécution dépend le bon fonctionnement du système d'assainissement et de sa pérennité. Le plus souvent, ces ouvrages sont préfabriqués et plus rarement coulés en place. Il s'agit des :

- regards de visite : nécessaires pour l'entretien et le contrôle des collecteurs enterrés ;
- regards avaloirs : servant à l'engouffrement des eaux ;
- têtes de buse pour l'entonnement des eaux et le maintien des terres ;
- divers raccordements (bourrelets*/descentes, descentes/fossés, ...) ;
- autres.

Quelques règles à appliquer :

- un regard devra être impérativement prévu à chaque changement de direction du tracé du collecteur, à une rupture de pente dans le profil en long et à une modification du diamètre du collecteur ;
- prévoir dans ces ouvrages des cunettes de décantation (mini : 10 cm de profondeur) qui piègeront les fines et les graviers.

Choix des ouvrages d'assainissement :

Choix des ouvrages d'assainissement Il n'existe a priori aucune solution toute faite et reproductible à tous les projets routiers. Toutefois, le choix d'un ouvrage d'assainissement doit principalement reposer sur 4 critères :

- sa capacité hydraulique ;
- son insertion dans le profil en long et le profil en travers du projet routier, donc sa géométrie qui prend en compte l'aspect sécurité de l'usager également ;
- son niveau de protection au regard de la vulnérabilité des eaux ;
- sa facilité d'entretien et d'exploitation des ouvrages

Entretien et exploitation des ouvrages :

Quelques recommandations sont à prendre en compte au niveau de la conception du projet :

- les ouvrages superficiels sont préférables aux ouvrages enterrés ;
- réduire autant que faire se peut les différentes typologies des ouvrages ;
- choisir des ouvrages rustiques et accessibles et des matériaux pérennes ;
- ne pas descendre en dessous d'un diamètre de 600 mm pour les traversées sous chaussée et 400 mm pour les demi-traversées pour des raisons d'entretien et de décantation des eaux mais également pour répondre à des problèmes de tassement. En effet, ces ouvrages qui reposent généralement sur le terrain naturel, subissent des charges importantes (remblai, trafic, ...) et peuvent prendre des flèches ;

- en cas de débouché sur un talus enherbé, accompagner la chute par une descente tuilée ;
- les traversées sous chaussées étant fortement sollicitées (charges statiques et dynamiques) prévoir des tuyaux adaptés ; on retiendra a minima une canalisation en béton armé série 135A . Prévoir sa protection en phase chantier.
- prévoir des accès aux ouvrages pour leur entretien (pistes, escaliers, refuges, ...) ;
- en alignement droit, l'espacement entre 2 regards peut être porté à 80 m compte tenu des performances des matériels d'entretien par hydro curage ;
- des regards visitables devront impérativement être posés sur le tracé; des regards d'entretien non visitables peuvent être éventuellement intercalés entre les regards visitables ;
- l'implantation des ouvrages doit se faire avec le souci permanent de la sécurité du personnel exploitant et en minimisant la gêne de l'utilisateur.

Définition :

Le drainage consiste à collecter et à évacuer les eaux internes de la route.

Qui fait quoi ?

La décision de drainer relève de la compétence des géotechniciens et des mécaniciens des chaussées. La préoccupation de l'assainissement routier est de caler l'ensemble des ouvrages de façon à assurer l'évacuation des drains.

Les effets de l'eau sur la route :

Il est illusoire de penser qu'une chaussée sera exempte d'eau, néanmoins on peut prévoir un dispositif de drainage qui concentre et canalise ces venues d'eaux vers l'extérieur de la plateforme le plus rapidement possible. Concevoir un drainage n'est pas forcément nécessaire dans tous les projets neufs (chaussées à faible trafic, absence de poids lourds, contexte hydrogéologique et hydrologique favorable, qualité des matériaux ...), mais préalablement, une analyse rigoureuse et des investigations poussées devront être menées avec des spécialistes des chaussées :

- les eaux infiltrées dans une chaussée (absence de drainage ou défaut d'assainissement) provoquent une détérioration rapide des ouvrages ;
- l'effet de « pompage » pendant les cycles gel-dégel détériore les performances des matériaux et, à terme, est responsable de la ruine de l'ouvrage ;
- les chaussées souples sont particulièrement vulnérables à la teneur en eau notamment celles traitées avec des GNT ;
- les couches de roulement en béton bitumineux ne sont pas étanches, les défauts d'entretien courant et le vieillissement des enrobés accroissent la perméabilité ;
- les interfaces des matériaux et les rives des chaussées sont des zones critiques ;

- les variations de la teneur en eau des matériaux constituant le corps de chaussée influent considérablement sur ses caractéristiques mécaniques.

Lutte contre la pollution routière :

Définition :

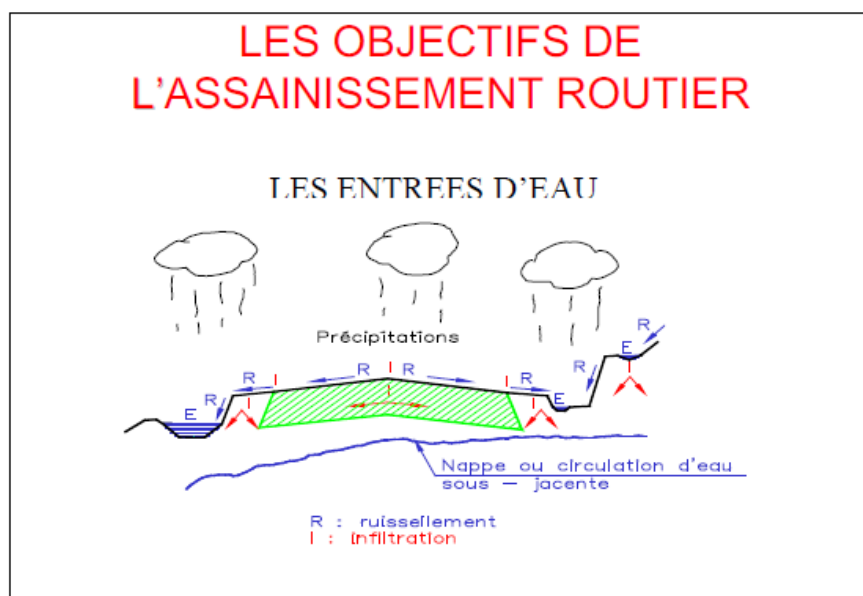
La lutte contre la pollution d'origine routière consiste à prévoir l'ensemble des dispositifs à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de la protection de la ressource en eau.

Qui fait quoi ?

Les spécialistes de l'environnement définissent et hiérarchisent les enjeux vis-à-vis de la Ressource en Eau (RE). Le concepteur dimensionne les ouvrages pour atteindre les objectifs de protection de la ressource en eau.

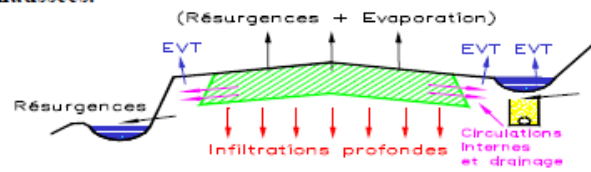
Les enjeux :

Les pollutions de chantier, chroniques, saisonnières et accidentelles sont susceptibles de dégrader la qualité de l'eau, de ses habitats et de ses usages. Il est rappelé, par ailleurs, que la lutte contre la pollution routière impose au chef de projet des obligations environnementales. Tout manquement à ces obligations peut conduire à des situations contentieuses et engager la responsabilité du maître d'ouvrage.



LES SORTIES D'EAU

Les sorties d'eau sont beaucoup moins rapides que les entrées car la perméabilité du sol est souvent inférieure à celles des couches de chaussées.



EVT : Evapotranspiration

La perméabilité des sols varie (en moyenne):

10^{-2} m/s pour les graviers	10^{-4} m/s pour la craie
10^{-5} m/s pour les sables	10^{-7} à 10^{-8} m/s pour les limons
10^{-10} m/s pour les argiles	

LA SECURITE DE L'USAGER

Eviter les stagnations d'eau sur la chaussée



LA SECURITE DE L'USAGER

Eviter les projections d'eau entraînant des pertes de visibilité



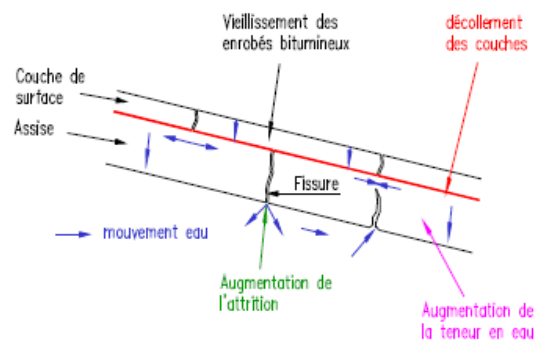
LA SECURITE DE L'USAGER

**Réaliser des ouvrages qui ne constituent pas des obstacles
en cas de sortie de route : tête de buse sécurité**



LA PROTECTION DE LA ROUTE

Action de l'eau sur les matériaux de chaussée



Glossaire :

Assainissement routier :

Ensemble des dispositifs constructifs contribuant à assainir la route dans trois domaines à savoir : - la collecte et l'évacuation des eaux de surface, - le drainage des eaux internes, - le rétablissement des écoulements naturels.

Atterrissement : Amas de terre, de sable, de limon, formé par les cours d'eau ou par la mer.

Alluvion, sédiment.

Bassin versant : Surface aménagée ou naturelle telle que toute l'eau reçue sur sa surface s'écoule vers un point unique : l'exutoire du bassin versant (bassin versant naturel et bassin versant routier).

Bassin de contenance : Terme générique désignant un ouvrage installé en série ou en parallèle d'un réseau et destiné à stocker temporairement les eaux de ruissellement.

Autres termes usités : bassin d'amortissement, de rétention, de stockage ou tampon et bassin écrêteur.

Berne : Partie non roulable de l'accotement Bief de confinement : Ouvrage linéaire de capacité destiné à confiner des pollutions accidentelles.

Bourrelet fil d'eau : Dispositif constructif linéaire de petites dimensions en crête de talus de remblai généralement en béton ou en enrobé destiné à guider latéralement une lame d'eau vers une descente d'eau.

Buse-arche : Ouvrage hydraulique en béton ou métallique utilisé pour le rétablissement des écoulements naturels et caractérisé par sa portée et sa flèche.

Caniveau : Famille d'ouvrages de collecte et de transport longitudinal des eaux de ruissellement de la route.

Coefficient d'entonnement K_e : Paramètre lié à la forme de l'entonnement de 84 Assainissement routier - GTAR Dalot : Ouvrage hydraulique enterré de section rectangulaire préfabriqué ou coulé en place et à forte capacité.

Débit capable : Débit maximal que l'on peut faire transiter par un ouvrage coulant à plein.

Débit de projet : Valeur du débit dimensionnant pour les ouvrages hydrauliques. Généralement, débit centennal pour les OH de rétablissement des écoulements naturels et décennal pour la plate-forme routière.

Écoulement à surface libre : Terme se rapportant à un écoulement à ciel ouvert dont la surface en miroir est en contact avec l'air.

Écoulement en charge : Par analogie à l'écoulement à surface libre, ce terme désigne par exemple un écoulement à pleine section dans une canalisation, c'est à dire sans volume d'air résiduel. Effet de bord : Mouvement d'eau latéral dans le sol au bord de la partie revêtue de la route.

Exutoire : Généralement, point de rejet des eaux hors de l'emprise routière.

Désigne également l'extrémité aval d'un ouvrage d'assainissement.

Fossé : Ouvrage hydraulique rustique, longitudinal et de collecte des eaux de ruissellement creusé dans le terrain au-delà de l'accotement, caractérisé par sa section courante et sa pente.

Gabion : Ouvrage constitué d'une cage ou panier en treillis métallique rempli de cailloux ou blocs de faibles dimensions, utilisé pour consolider les berges d'un cours d'eau.

Géo membrane : Produit adapté au génie civil, mince, souple, continu, étanche au liquide même sous les sollicitations en service.

Hauteur d'eau amont : HAM, hauteur de la ligne d'eau à l'entrée de l'ouvrage hydraulique.

Hauteur d'eau aval : HAV, hauteur de la ligne d'eau à l'aval immédiat de l'OH. Sa valeur est fonction du régime à l'aval de l'ouvrage.

Hauteur d'eau critique : Valeur théorique déterminée à partir d'abaque pour définir le régime d'écoulement.

Hauteur d'eau normale : Idem ci-dessus.

Hydraulique : Étude de l'écoulement des liquides et en particulier de l'eau.

Hydro géomorphologie : Discipline scientifique qui consiste à étudier finement la morphologie des plaines alluviales et à retrouver sur le terrain les limites physiques associées aux différentes gammes de crues qui les ont façonnées.

Hydrogéologie : Discipline scientifique qui s'intéresse à la circulation des eaux souterraines et au comportement des nappes.

Hydrologie : Discipline scientifique qui s'intéresse au cycle de l'eau.

Hydroplanage : Phénomène de perte de contact par interposition d'eau en couche épaisse entre le pneu et la chaussée.

Impluvium : Surface recevant la pluie, synonyme de bassin versant. Noue : Terre grasse et humide – extrémité des bras morts.

Plate-forme : Au sens géométrique, surface de la route qui comprend les chaussées et les accotements.

Perméabilité : Aptitude d'un sol ou d'un matériau à laisser s'écouler un fluide.

Périmètre mouillé : Dans une section d'écoulement, longueur de contact entre l'eau et la paroi de l'ouvrage.

Période de retour : Intervalle de temps moyen séparant deux occurrences d'un événement caractérisé. Noté T, c'est l'inverse de la fréquence.

Pluie journalière : Pluie non centrée mesurée de 6 h (Temps universel) le Jour J à 6h (Temps universel) le Jour J+1.

Pluviographe : Appareil enregistreur des événements pluvieux. Son dépouillement permet notamment d'obtenir les courbes intensité-durée de pluie pour différentes fréquences.

Point d'arrêt : Point défini dans un document approprié au-delà duquel une activité ne doit pas se poursuivre sans l'accord d'un organisme ou d'une autorité désignée.

Portance : Comportement en déformation d'un sol, remanié ou non, sous l'action des charges qui lui sont appliquées.

Radier (rd) : Fond de bassin Rayon hydraulique : Rapport de la surface mouillée sur le périmètre mouillé.

Régime critique : Frontière théorique entre le fluvial et le torrentiel Régime fluvial : Écoulement à surface libre dont le nombre de Froude est inférieur à 1 (une perturbation peut remonter le courant). En régime fluvial une perte de charge se traduit par un abaissement de la ligne d'eau.

Régime torrentiel : Écoulement dont le nombre de Froude est supérieur à 1, caractérisé par le fait qu'une perturbation ne peut remonter le courant. En régime torrentiel, une perte de charge se traduit par un exhaussement de la ligne d'eau.

Ressaut hydraulique : Elévation de la ligne d'eau due au passage du régime torrentiel au régime fluvial.

Section mouillée : Section d'un ouvrage occupée par l'écoulement.

Substratum : Roche en place plus ou moins masquée par des dépôts superficiels Taux de remplissage : Rapport entre la hauteur d'eau et la hauteur nominale ou le diamètre nominal d'un ouvrage hydraulique.

Temps de concentration : Temps mis par l'eau pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné de l'exutoire et ce dernier.

Talweg : Ensemble des points les plus bas d'une vallée Tirant d'air : Hauteur libre entre la ligne d'eau et l'intrados d'un ouvrage hydraulique type conduite.