



## BASSIN VERSANT

**1- Définition.** Etant donné un réseau d'évacuation des eaux pluviales, naturel et ou artificiel, enterré et ou de surface, on appelle bassin versant l'ensemble constitué par ce réseau et les surfaces qui potentiellement contribuent à l'alimentation de ce réseau, par ruissellement de surface des eaux d'origine météorique <sup>1</sup>.

*Compléments.* Un bassin versant est caractérisé par trois composantes principales:

- 1- sa limite, l'enveloppe des surfaces potentiellement drainantes et les extrémités aval du réseau de drainage;
- 2- son organisation qui peut être reliée à la structure du réseau, à la distribution surfacique des éléments de drainage etc.;
- 3- sa composition, les types de recouvrement de surface, et quelques grandeurs géométriques associées.

Le domaine de l'hydrologie urbaine couvre les bassins versants plus ou moins urbanisés, possédant un réseau de drainage totalement ou partiellement artificiel, de surface et ou enterré. Il n'existe pas de limites évidentes entre bassins urbanisés et bassins non urbanisés. Les agglomérations urbaines se caractérisent plutôt par un continuum du centre vers la périphérie (si tant est que ces notions de centre et de périphérie aient encore un sens), avec une diminution de la densité d'urbanisation. C'est ainsi que la frontière entre hydrologie urbaine et hydrologie générale, fluviale, de surface, etc., tend à s'amenuiser. Si différence il y a, elle provient pour une bonne part des domaines de validité pour lesquels certains modèles ou approches ont été calés <sup>2</sup>.

Les réseaux de drainage urbain, qu'ils soient de type séparatif ou non, drainant des eaux d'origine météorique (la pluie) et des eaux usées (domestiques et industrielles), le bassin versant est le siège de cinq phénomènes de base appartenant au cycle de l'eau; la réévaporation, le stockage en surface, la pénétration en sous sol, le ruissellement de surface et les écoulements en réseaux. En considérant la circulation et l'évacuation des eaux pluviales, le bassin versant est un système au sein duquel se réalise un processus qui transforme une pluie précipitée en débits évacués par un réseau de drainage artificiel ou non. Ce processus est classiquement représenté par deux opérateurs, une fonction de production qui détermine la part de l'eau pluviale recueillie par le réseau de drainage, une fonction de transfert qui représente le rôle du réseau sur l'écoulement de cette eau vers l'aval du bassin versant <sup>3</sup>.

Précisons que cette notion de bassin versant est à distinguer des notions classiques en hydrologie de surface, que sont les bassins expérimentaux et les bassins représentatifs <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Un réseau est un système connexe de biefs et ou canalisations qui peut présenter une structure de type ramifié et ou maillé, posséder un ou plusieurs exutoires. Ces exutoires peuvent simplement être des points de coupures sur un réseau situé à l'aval de celui considéré.

<sup>2</sup> A titre d'illustration, on peut rappeler que la valeur du coefficient d'imperméabilisation de 20% (rapport de la surface imperméable sur la surface totale du bassin versant), valeur minimum pour pouvoir utiliser la formule de Caquot, fait encore figure de seuil.

<sup>3</sup> Le transfert est théoriquement fonction de l'organisation du bassin versant, la production, de sa composition surfacique.

<sup>4</sup> Nous l'avons vu précédemment, un bassin versant est un ensemble de surfaces d'apports contribuant à alimenter un réseau de drainage en effluents. Un bassin représentatif fait figure de norme par rapport à une catégorie de bassins versants afin d'en étudier les comportements hydrologiques. Le bassin expérimental permet par action sur sa composition et son contenu de définir l'impact d'une modification sur son comportement hydrologique. En hydrologie urbaine, ces catégories n'ont pas le développement qui existe en hydrologie générale. On évoque la notion de bassin expérimental, qui équipé d'un appareillage de mesure, permet de calibrer tel ou tel modèle, censé représenter la transformation pluie-débit ou autre phénomène hydrologique.

L'urbanisation croissante des bassins versants a eu un impact considérable sur le cycle de l'eau, tant au niveau quantitatif qu'au niveau qualitatif. L'imperméabilisation des sols favorise le ruissellement de surface au détriment d'une infiltration en direction des nappes phréatiques, augmentant ainsi la part des volumes précipités, recueillie par les réseaux de drainages naturels et artificiels. Cette imperméabilisation et le remplacement des réseaux naturels par des réseaux artificiels ont considérablement accru les vitesses de propagation, par diminution des temps de concentration <sup>5</sup>. Les réseaux d'égouts concentrent dans le temps et dans l'espace les effluents d'origine météorique; cela se traduit par de forts débits de pointe, associés aux événements pluvieux plus ou moins importants.

D' un point de vue qualitatif, l'urbanisation des bassins versants a un impact sans cesse croissant sur la qualité des eaux d'origine météorique, qui par lavage du sol urbain, concentre brutalement tout un ensemble de polluants (métaux lourds, matières en suspension, etc..).

Le bassin versant, tout en étant l'unité de base de l'hydrologie urbaine, tant quantitative que qualitative, devient un élément essentiel des politiques urbaines, chargées de maîtriser les impacts environnementaux de l'urbanisation.

**2- Historique.** Rappelons brièvement que l'Encyclopédie de Diderot du dix-huitième siècle ne fait pas mention de la notion de bassin versant; l'hydrologie est "*cette partie de l'histoire naturelle qui s'occupe de l'examen des eaux en général, de leur nature et propriété*" <sup>6</sup>. La notion de bassin versant fut forgée de façon quasi définitive au cours du dix-neuvième siècle, avec le développement de l'hydrologie de surface. En effet cette notion fut bâtie afin de pouvoir élaborer un schéma expliquant l'apparition des débits et volumes d'eau, mesurés et observés sur les réseaux fluviaux; les premières mesures de débits en réseaux fluviaux datent de cette époque: premier jaugeage du Rhin en 1867<sup>7</sup>. Il s'en suit l'élaboration des premières formules de calcul permettant de relier intensités pluvieuses et débits écoulés en une section d'un réseau de drainage ( formule rationnelle dit "américaine" par exemple, basée sur la multiplication d'une valeur d'intensité moyenne de pluie par une valeur de surface, tout ou partie de celle du bassin versant considéré). C'est au cours de ce siècle, que vont naître les premières formules et méthodes autorisant une approche rationalisée pour la conception et la réalisation du tout à l'égout. Ces méthodes et formules sont à la base de l'hydrologie urbaine <sup>8</sup>. Elle empruntera à l'hydrologie de surface la notion de bassin versant, le réseau d'égouts remplaçant tout ou partie des réseaux de drainage "naturel" afin d'améliorer l'assainissement urbain. Si la notion même de bassin versant, qualifié de bassin d'apport par P. Koch (cf. note 8), est quasi stable depuis le siècle dernier, par contre l'évolution de la modélisation des phénomènes hydrologiques, le développement de nouvelles technologies de calcul, les questions nouvelles auxquelles est confronté la science de l'hydrologie urbaine, la complexité de la morphologie des réseaux de drainage artificiel, vont sensiblement modifier l'intérêt de cette notion, sans pourtant en diminuer la portée. En effet,

<sup>5</sup> En première approche, le temps de concentration correspond au temps minimum nécessaire pour qu'apparaisse, à l'exutoire du bassin, le débit de pointe, lorsque la pluie est uniforme en intensité.

<sup>6</sup> Encyclopédie de Diderot, 18-ième siècle, p. 881.

<sup>7</sup> Encyclopaedia Universalis, Paris, 1989, *Hydrologie*, pp.796-806. L'origine de la circulation des eaux, et en particulier celle des eaux souterraines fut un long débat, fort controversé. Il faut attendre la Renaissance avec Bernard Palissy pour que de multiples spéculations laissent la place à un premier schéma rationnel du cycle de l'eau. Ce n'est qu'à la fin du dix-huitième siècle que l'on va tenter de relier les débits observés sur les réseaux fluviaux aux précipitations. Ce rapprochement induit la concrétisation de la notion de bassin versant.

<sup>8</sup> En ce qui concerne le cas français, il faut évoquer "*L'inspecteur général Dupuit, (qui), paraît, le premier, être remonté de l'effet à la cause en rapprochant le ruissellement urbain de la précipitation; il proposait de calculer le débouché d'un collecteur à partir de la formule de Chézy:  $RI=bu^2$ , en admettant que le débit Q à évacuer était celui de la précipitation, à la cadence de 45 mm à l'heure sur le bassin desservi par le collecteur*". (P. Koch, Les réseaux d'égouts, Dunod, Paris, 1954, p.2). Belgrand qui lui succède, améliore la relation numérique entre précipitation et débit au débouché d'un collecteur. Ses formules et valeurs numériques seront utilisées au cours du dix-neuvième siècle par la plupart des villes françaises se dotant d'un réseau d'égouts, en l'absence de mesures et observations locales. La notion de bassin versant structure l'organisation des réseaux de drainage artificiel.

si l'on s'en réfère à l'hydrologie de surface, la notion de bassin versant est associée à un réseau de drainage (naturel), dont la structure est ramifiée, débouchant ainsi sur un seul élément de drainage (l'exutoire), auquel est associé un bassin d'apport, qui englobe cet élément et tout son réseau aval. La définition que nous avons donnée du bassin versant est référée à cette origine historique. Si l'on considère la seule morphologie des réseaux de drainage artificiel urbain, surtout lorsqu'ils sont de type unitaire, il faut bien convenir que leur structure s'est quelque peu éloignée de cette forme strictement ramifiée. Le principe du maillage s'étant développé, étant même constitutif des premiers grands réseaux d'égouts urbains, la notion élémentaire de bassin versant ne peut plus être appliquée avec la même rigueur. Un réseau urbain peut présenter de multiples exutoires, à chacun desquels il est quasiment impossible d'associer une surface d'apport clairement définie; à moins de considérer le tout, c'est à dire l'ensemble des exutoires et le réseau qui les dessert. Pour rendre compte de cette complexité structurelle, il faut faire appel à une définition complémentaire du bassin versant qui s'apparente plus à celle élaborée et proposée par l'hydraulique, qu'à celle proposée par l'hydrologie fluviale. Le bassin versant devient alors un objet dont la structure d'écoulement est configurée par un réseau de drainage fortement maillé, avec plusieurs exutoires et éventuellement de multiples entrées situées à l'amont, si le réseau considéré est un sous réseau, constitué par un ensemble de coupures amont sur un réseau englobant afin d'en délimiter une zone particulière d'étude. Le développement des nouvelles technologies de calcul, l'usage de modèles de propagation issus de l'hydrodynamique, la construction de modèles de transfert de flux s'appuyant sur une approche "réservoir" autorisent la constitution de tels ensembles (réseaux plus surfaces drainantes) qui ne coïncident plus avec la définition classique que nous avons donnée du bassin versant qui, rappelons le, en hydrologie de surface, est un tout possédant un seul exutoire<sup>9</sup>.

**3- Intérêt.** En hydrologie urbaine, la notion de bassin versant présente au moins deux intérêts.

Tout d'abord, le bassin versant est l'unité spatiale à partir de laquelle est définie l'organisation globale d'un réseau de drainage d'une agglomération urbaine. En effet, les réseaux qu'ils soient séparatifs ou non, ont un fonctionnement hydrologique et hydraulique dont le moteur traditionnel est la gravité. L'espace urbain est alors découpé en bassins versants, définis comme étant le lieu géométrique des points de l'espace où les précipitations sont susceptibles de contribuer au ruissellement en direction du réseau de drainage qui possède ou possèdera un ou plusieurs exutoires situés à l'aval du réseau. Cette définition du bassin versant qui, par exemple, sert à concevoir l'organisation d'un réseau eau pluviale urbain, s'apparente fort logiquement à la définition donnée par l'hydrologie générale. Le découpage en bassins versants relève d'une approche topographique et hydrographique du milieu. Il instrumentalise la notion de limite; un bassin versant est délimité en amont par ses lignes de crêtes (mouvement anticlinal) et à l'aval par ses lignes de thalweg (mouvement synclinal). Cependant il faut bien convenir que cette définition, toute théorique du bassin versant (naturel), est d'un emploi délicat en milieu urbain, caractérisé par une organisation complexe de ses éléments. L'artificialité du milieu peut sensiblement modifier la trajectoire des ruissellements de part la présence d'obstacles (murs, voies publiques etc) et affranchissement des contraintes naturelles de terrain, conduisant ainsi à une organisation du ruissellement, sensiblement différente des cheminements naturels préexistants.

---

<sup>9</sup> Cette petite remarque sur le passage du bassin versant hydrologique au bassin "hydraulique" n'est pas sans rapport avec la tension entre milieu naturel et milieu artificiel. C'est par cette tension qu'il y a différence entre hydrologie générale, de surface, fluviale et hydrologie urbaine.

En second lieu, que ce soit pour dimensionner un réseau et ou simuler son fonctionnement hydrologique, le bassin versant est la grandeur à partir de laquelle est défini le rapport entre production des effluents (d'origine météorique, ménagère et industrielle) et écoulement de ceux ci dans le réseau de drainage. Le découpage d'une zone d'étude en bassins versants n'est pas un en-soi. Il est fonction de multiples facteurs. On peut évoquer tout d'abord la finalité même du calcul. S'agit-il de dimensionner un ouvrage, un collecteur par exemple, exutoire d'un bassin versant? S'agit-il de simuler le fonctionnement hydraulique complet d'un réseau ou d'un sous-réseau, bief par bief ? S'agit-il de simuler l'apport d'une surface situé à l'amont du réseau considéré ? Etc. On peut également évoquer les capacités technologiques de calcul, la plus ou moins grande maîtrise des modèles censés représenter telle ou telle partie du cycle de l'eau (modèles de ruissellement, modèles de perte, modèles d'écoulement en réseau, etc..) On peut également évoquer la plus ou moins grande connaissance des réseaux de drainage existants, la connaissance de l'état des surfaces entourant ces réseaux, etc..

Le choix du découpage d'une zone urbaine en bassins versants dépend de l'ensemble de ces facteurs. C'est ainsi qu'une même zone peut être définie comme une composition plus ou moins compliquée de bassins versants dont la taille peut varier de quelques centaines de mètre carré à quelques hectares, selon le niveau souhaité de représentation, ou comme un seul et unique bassin versant, avec un ou plusieurs exutoires, suivant la configuration aval du réseau.

Pour le premier de ces deux cas, la notion même de bassin versant, dans sa définition traditionnelle, une surface organisée autour d'un réseau de drainage contenue dans celle-ci, peut se réduire à celle de surface d'apport, liée à tout élément singulier d'un réseau. En effet, le découpage de la surface peut être effectué à partir de chacun des éléments singuliers qui composent le réseau; bief, point de jonction, point de bifurcation, ouvrage particulier comme les bassins de stockage, déversoir, etc. Chacun de ces éléments réalise une transformation particulière du flux, provenant des éléments situés à son amont et de la surface qui lui est plus ou moins directement associée <sup>10</sup>.

A part ce cas "extrême" de découpage d'une zone en surfaces élémentaires à partir de chacun des constituants d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales, un bassin versant urbain peut contenir un ensemble d'éléments singuliers du réseau, autres que ses seuls tronçons. Quoiqu'il en soit, c'est un tout, qui par rapport à la question du ruissellement et des écoulements est défini comme réalisant une transformation globale, entre pluie incidente (P) et débits sortant à l'aval du bassin (Q):

$$Q = A \cdot P \text{ avec } A, \text{ opérateur représentant le rôle du bassin versant}$$

La modélisation des bassins versants est associée la définition de cet opérateur.

**4- Modélisation des bassins versants.** En hydrologie urbaine, la représentation ou modélisation d'un bassin versant n'est pas un en-soi, indépendant de tout phénomène hydrologique qui s'y déroule. La représentation de l'organisation et de la composition d'un bassin versant est intimement liée aux modèles hydrologiques censés en représenter le fonctionnement. On peut même avancer que la modélisation hydrologique d'un bassin versant est configurée par telle ou telle approche en matière de modèle, censé représenter la transformation pluie-débit, et non pas l'inverse. Nous avons vu précédemment que le découpage d'une zone urbaine en bassins versants résultait d'un compromis entre données

<sup>10</sup> Les outils informatiques qui ont été réalisés depuis plusieurs décennies pour simuler le fonctionnement hydrologique des réseaux d'assainissement urbain, bief par bief, pour assurer leur gestion en temps différé ou en temps réel, sont basés sur une modélisation de l'organisation du réseau, bief par bief, ouvrage singulier par ouvrage singulier. Sans être nécessairement non utilisée, la notion de bassin versant comme nous l'avons initialement présentée, n'est pas à la base du système de données, associé à la représentation du réseau et de ses surfaces d'apport.

topographiques, morphologiques, finalités de l'approche et connaissances des données urbaines. Il faut rajouter à cet état de chose, la virtualité de la surface obtenue vis à vis de la question du ruissellement; *c'est le phénomène pluvieux lui même qui permet de caractériser les limites et le contenu d'un bassin versant.*

Si une étude morphologique et topographique permet de délimiter un bassin versant à partir des lignes de crêtes et thalweg, cela ne signifie pas pour autant que tout l'intérieur de la zone contribue au ruissellement, quelque soit la pluie. La surface obtenue à partir d'une étude topographique peut être désignée comme étant une surface potentiellement drainée par le réseau qui structure ce bassin. Les antécédents pluviométriques, les intensités de la pluie considérée, leur distribution temporelle, les rapports complexes de voisinage entre surfaces imperméables et surfaces perméables, sont un ensemble de paramètres qui vont définir le contour du bassin versant efficace, entendu comme étant la part (éventuellement variable dans le temps) du bassin versant qui contribue effectivement au ruissellement en direction du réseau de drainage <sup>11</sup>.

Cette imbrication entre modélisation d'un bassin versant et phénomènes hydrologiques se retrouve lorsque les phénomènes pluvieux sont représentés par des événements artificiels devant représenter une pluviosité locale. En effet, ces événements, dénommés pluie de projet, ont une durée et une intensité qui peuvent être définies en fonction de quelques caractéristiques géométriques des bassins versants <sup>12</sup>.

Ce caractère fort relatif de la modélisation d'un bassin versant est bien souligné par les deux types de modèles classiques qui suivent, permettant de relier la pluie au débit.

Pour le premier, que se soit la formule rationnelle américaine ou la formule de Caquot, le bassin versant est représenté par une grandeur de surface plus ou moins facile à déterminer, la surface ruisselante, une pente moyenne, etc. Pour le second, théorie de l'hydrogramme unitaire de L.K. Scherman (1932, U.S.A.) par exemple, le bassin versant est le siège d'un ensemble de phénomènes dynamiques. Quantitativement, il est représenté par une fonction de transfert variant dans le temps, dont la définition ne se rapporte pas à quelques grandeurs géométriques, si ce n'est par volonté de rattacher cette fonction à quelques caractéristiques géométriques; exercice d'autant plus délicat que la fonction de transfert n'est pas unique; elle dépend de la pluie <sup>13</sup>.

Abstraction faite de la question des limites, la modélisation des bassins versants en hydrologie urbaine est à faire à la lecture de quelques modèles hydrologiques comme ceux traitant de la question du rapport entre pluie et débits obtenus à l'aval des bassins versants. Nous venons d'évoquer la formule de Caquot qui sert à dimensionner un collecteur, le modèle de Scherman, modèle expérimentale représentant la transformation d'un hyétogramme en hydrogramme <sup>14</sup>. Il conviendrait de rajouter à cette liste, tout un ensemble de modèles comme les modèles à réservoir, les modèles dit isochrones, les modèles à simple translation, etc.. Quoiqu'il en soit, l'ensemble de ces modèles utilisent pratiquement

---

<sup>11</sup> Ce passage du virtuel au réel en matière de volume ruisselé et écoulé par le réseau de drainage, peut être représenté par deux grandeurs; la surface potentiellement drainante et la surface efficace. La première peut être définie comme étant la surface totale du bassin versant. La seconde n'a pas nécessairement d'existence matérielle évidente. On peut en première approche la définir à partir d'un rapport volumétrique entre hauteur de pluie précipitée multipliée par la surface potentiellement drainante et volume écoulé par le réseau de drainage; cette surface varie avec la pluie.

<sup>12</sup> Sans rentrer dans une présentation quelque peu détaillée des relations entre pluie de projet et caractéristiques des bassins versants, on comprend aisément que le temps de concentration qui correspond à la durée de ruissellement et d'écoulement, nécessaire pour obtenir une contribution maximum d'un bassin, soit utilisé en temps que paramètre pour définir la durée d'une pluie de projet.

<sup>13</sup> Rappelons que la fonction de transfert est obtenue par déconvolution entre un signal sortant et un signal entrant. La relation entre pluie et débit n'étant pas un phénomène linéaire, le noyau de convolution entre pluie et débit varie en fonction de la pluie; l'hydrogramme unitaire n'est pas unique.

<sup>14</sup> Un hyétogramme est la répartition sur la durée d'une pluie, des intensités. Un hydrogramme est la répartition sur le temps des débits transitant en un point d'un réseau.

tous quelques paramètres et grandeurs qui se rapportent aux deux composantes principales que sont:

- l'organisation d'un bassin, assimilable à la structure de son réseau de drainage, la distribution des surfaces drainantes;
- la composition surfacique du bassin.

Notre propos en ce texte n'est pas de faire une stricte synthèse de ces paramètres et grandeurs; pour ce faire nous renvoyons le lecteur à la présentation de l'ensemble des modèles de transformation pluie-débit, présentés en ce document. Nous avons préféré présenter quelques approches qui par ailleurs pour certaines, restent encore du domaine de la recherche.

**4.1- Modélisation de l'organisation d'un bassin versant.** La transformation pluie-débit, réalisée par un bassin versant, dépend de la distribution des surfaces drainantes par rapport à son ou ses exutoires. Cette distribution est reliée à la structure du réseau de drainage qui organise la collecte des effluents d'origine météorique. La fonction de transfert qui représente l'effet des écoulements sur les débits obtenus à l'aval du bassin dépend de son organisation

<sup>15</sup>.

Les bassins versants ne sont pas des figures géométriques simples. Pour pouvoir prendre en compte cet effet de l'organisation sur la transformation pluie-débit, deux voies sont traditionnellement utilisées. Elles sont en partie commune à l'hydrologie urbaine et l'hydrologie de surface.

La première consiste à assimiler tout bassin versant à une forme plus simple, équivalente. La littérature hydrologique n'est pas avare de définitions de paramètres permettant d'opérer cette assimilation. Cependant il faut bien convenir qu'il sont d'un usage peu fréquent en hydrologie urbaine. On peut citer à titre d'exemple l'indice de compacité, défini comme suit

$$C = 0,28 P.A^{-1/2}$$

( C indice de compacité, P périmètre du bassin versant, A sa surface)

La détermination d'un rectangle équivalent<sup>16</sup> permet de définir un coefficient d'allongement  $E = L / A^{1/2}$  avec L longueur du rectangle équivalent. Ce type de coefficient d'allongement est couramment utilisé dans les formules de transformations pluie-débit permettant le calcul d'un débit de pointe comme la formule de Caquot, qui, en plus de ce correctif, utilise une valeur de surface ruisselante et de pente moyenne du bassin versant.

Cependant comme le note G. Réménieras<sup>17</sup> " *ces quantifications restent le plus souvent un exercice de style car les paramètres correspondants ne trouvent pas leur place dans les modèles pluie-débit, dont les paramètres sont pour la plupart du temps des coefficients issus d'une régression* " .

La seconde voie relève globalement de la morphométrie. Quelque soit sa complexité, le bassin versant n'est plus assimilé à une figure simple, comme un rectangle équivalent.

<sup>15</sup> On comprend aisément qu'un bassin très allongé à partir de son exutoire n'aura pas le même comportement que la même surface, très ramassée autour de son exutoire. Dans le second cas, il y a superposition des effets et concentration dans le temps des effluents.

<sup>16</sup> La compacité d'une surface circulaire est égale à 1, celle d'un carré égale à 1,12. Connaissant de façon plus ou moins exacte, le périmètre du bassin versant et sa surface, on peut alors l'assimiler à un rectangle (L, l) tel que  $2(L + l) = P$ ;  $L.l = A$ ; P. Dubreuil, Initiation à l'analyse hydrologique, Paris 1974, 216p.

<sup>17</sup> Encyclopaedia Universalis, Paris, 1989, article sur l'hydrologie (auteur: G. Réménieras).

L'organisation d'un bassin versant est directement modélisée soit à partir de la position " temporelle " des surfaces drainées par rapport à l'exutoire (modèle des courbes isochrones), soit par le biais de la modélisation de la structure du réseau de drainage - classification de Strahler, dimensionnement fractal de la structure d'un réseau - . Ces trois approches ont été plus ou moins développées en hydrologie urbaine et hydrologie fluviale.

- *Modèle des courbes isochrones :*

La finalité de cette approche est de construire un opérateur (de convolution en règle générale) permettant de représenter la transformation pluie-débit comme suit :  $Q(t) = A(t) \cdot i(t)$  avec  $A(t)$  distribution temporelle de la surface drainante par rapport à l'exutoire. Pour bâtir numériquement ou analytiquement  $A(t)$ , la surface du bassin versant est structurée par des lignes de niveau de temps, plus ou moins resserrées, le ruissellement et les écoulements mettant au maximum l'intervalle de temps choisi, pour " aller " d'une courbe à sa suivante. Cette méthode des courbes isochrones est à la base du développement de la méthode rationnelle américaine <sup>18</sup>. Il va s'en dire que la difficulté de la méthode consiste à opérer le découpage en courbes isochrones <sup>19</sup>.

- *Classification de Strahler :*

A partir de cette approche, l'organisation d'un bassin versant est uniquement définie par celle de son réseau de drainage. Peu utilisée, puisque peu représentative de la structure des réseaux de drainage, la classification de Horton est à la base d'un ensemble de modélisations qui se sont largement inspirées des travaux de ce pionnier, comme celles de Strahler, Smart, Schumm, etc. <sup>20</sup>.

Le principe de base de la classification de Strahler consiste à ordonner les tronçons d'un réseau de drainage à partir d'une règle élémentaire; tous les tronçons extrêmes sont d'ordres 1, deux tronçons de même ordre  $w$  se joignant, le tronçon aval est d'ordre  $w+1$ , deux tronçons d'ordres différents  $(v,w)$  se joignant, le tronçon aval est d'ordre  $\max(v,w)$ . Le réseau ainsi classifié est dense géométriquement si le rapport  $n_{w-1}/n_w$  est quasi constant quelque soit  $w$ , avec  $n_w$  nombre de tronçons d'ordre  $w$ . L'organisation du bassin versant est représenté par un ensemble de rapports <sup>21</sup>, comme le précédent, qui peuvent être utilisés pour bâtir un modèle de transformation pluie-débit. En hydrologie urbaine les limites de cette méthode sont évidentes ; le réseau doit être strictement ramifié et ne posséder qu'un seul exutoire. La complexité morphologique des réseaux d'égouts ne permet guère l'usage de cette classification, par ailleurs, fort développée en hydrologie fluviale.

- *Dimension fractale des réseaux d'assainissement.*

La théorie de la dimension fractale est appliquée depuis quelques années déjà pour modéliser l'organisation des bassins versants à partir des seuls réseaux d'assainissements. Quoique d'application timide encore, cette approche permet de rendre compte de la complexité morphologique des réseaux qu'ils soient ramifiés ou non; "*elle est sans doute*

<sup>18</sup> Cette méthode, au départ formulée comme suit,  $Q=C.I.A.$  avec  $C$  coefficient de ruissellement,  $I$ , valeur d'intensité,  $A$ , surface totale du bassin versant, a été modifiée pour pouvoir représenter la transformation d'un hétérogramme en hydrogramme.

<sup>19</sup> G. Réménieras, L'hydrologie de l'ingénieur, Paris, Eyrolles, 1976,p.51.

<sup>20</sup> Smart (J.S.) Channel networks, Advances in Hydrosciences, 1972, vol8, p.305-346; Strahler (A.N.), Quantitative Analysis of watershed géomorphology, Trans. Am. Géophys. Union, 1957, vol 38, n°6, p.913-920.

<sup>21</sup> Le réseau étant ordonnancé, chaque classe de tronçons peut être caractérisée par tout un ensemble de grandeurs; leur longueur moyenne, la surface moyenne de ruissellement qui leur est directement associée, etc.

susceptible d'asseoir la modélisation des bassins versants sur des paramètres dont la signification physique sera indiscutable " (G. Rémériéras op.cit.).

En faisant appel à la théorie de la dimension fractale, la technique de dimensionnement de l'organisation des réseaux d'assainissement revient à vérifier si numériquement son développement spatial à partir de l'exutoire est suffisamment bien approximé par une loi de type "puissance", de la forme:

$$C(u) = a \cdot u^D$$

avec  $u$  la "longueur" du rayon de la boule centrée sur l'exutoire et  $C(u)$ , le contenu de la boule, défini avec la même unité que  $u$ . Si  $u$  est une mesure spatiale de longueur,  $C(u)$  est la longueur totale du réseau contenu dans la boule de rayon  $u$ <sup>22</sup>.  $D$  est alors la dimension (non entière en règle générale) du réseau considéré que l'on peut appeler dimension de contenu.

Cette relation entre contenu et contenant est allométrique pour les réseaux dont l'organisation peut être apparentée à celle qui résulte de la mise en oeuvre d'un principe d'homothétie<sup>23</sup>. L'exposant de la relation entre contenu et contenant est alors voisin de la dimension d'homothétie  $D$ , caractéristique du processus de génération du réseau. La relation suivante illustre le rapport entre contenu et contenant:

$$L(R) = a \cdot l(1-D) \cdot R^D$$

avec  $L$  longueur du réseau contenu dans une boule de rayon  $R$  centrée sur le noeud origine,  $l$  longueur moyenne des tronçons du réseau,  $D$  dimension d'homothétie et  $a$  coefficient s'apparentant au nombre de réseaux de dimension  $D$  se joignant au noeud origine<sup>24</sup>.

Cette relation dernière dessine un voisinage entre cette méthode de modélisation et la méthode des courbes isochrones, si l'on accepte l'hypothèse que les vitesses de transfert des eaux pluviales sont quasi uniformes pour la majorité des grandeurs de débits. On peut même démontrer que le modèle de transfert de Nash, composé de deux noyaux de convolution -  $Q(t)=A(t) \cdot B(t) \cdot I(t)$  avec  $Q(t)$  hydrogramme à l'aval du réseau,  $I(t)$ , hyétogramme - est le résultat de la mise en oeuvre d'un modèle de transfert, bâti à partir de la modélisation de l'organisation d'un bassin à l'aide de la théorie de la dimension fractale, ce réseau étant réduit à son drain principal ( $D=1$ )<sup>25</sup>.

Au delà de son aspect cognitif, permettant de mieux cerner la signification physique de quelques paramètres, l'usage de la dimension fractale permet de modéliser l'organisation d'un réseau maillé et ou ramifié. Cependant le calcul de la relation entre contenu et contenant nécessite bien évidemment d'appliquer la méthode sur des réseaux ne possédant qu'un exutoire à l'aval.

<sup>22</sup> S. Thibault, Morphology and growth of urban technics networks: a fractal approach, Revue Flux C.N.R.S., Juin 1995, 20p.

<sup>23</sup> Le principe d'homothétie consiste à remplacer à chaque étape de génération d'un réseau tout les segments par une même figure. Pour ce faire, tout segment est transformé en un réseau de  $N$  segments, chacun d'eux étant d'une longueur égale à  $r$  fois celle du segment remplacé; ce dernier peut éventuellement faire partie du réseau créé. La dimension d'homothétie est définie par le rapport entre nombre de parties créées et coefficient de réduction,  $D=\ln(N)/\ln(1/r)$ .

<sup>24</sup> S. Thibault, Modélisation morphofonctionnelle des réseaux d'assainissement à l'aide du concept de dimension fractale. Thèse D.E., I.N.S.A. de Lyon, 1987, 303p.

<sup>25</sup> Rappelons que ces deux noyaux de convolution sont paramétrés par un temps moyen de transfert (lag-time). L'un deux correspond au temps moyen de transfert dans le drain principal, l'autre au temps moyen mis par l'eau pour y arriver.

Le mode de quantification que nous venons d'exposer brièvement ne peut pas être appliqué, tout comme la méthode des courbes isochrones et la classification de Strahler, aux bassins et réseaux possédant plusieurs exutoires. On ne peut plus guère évoquer la notion de bassin versant avec le sens qui lui fut attribuer à son origine. Pour de tels bassins, la modélisation de leur organisation doit être basée sur d'autres approches, si cette modélisation se révèle utile. Pour ce faire on pourra s'en référer à quelques travaux de recherches récents<sup>26</sup>. En ce qui concerne la théorie de la dimension fractale, de tels réseaux peuvent cependant être caractérisés morphologiquement par une dimension de recouvrement et non plus une dimension de contenu, comme nous l'avons précédemment définie<sup>27</sup>. A ce jour, ce type de modélisation morphologique n'a pas fait l'objet d'un quelconque rapport avec l'aspect fonctionnel des réseaux à plusieurs exutoires.

**4.2- Modélisation de la composition des bassins versants.** En hydrologie urbaine, la modélisation de la composition des bassins versants est intimement liée à la question du ruissellement de surface. La connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versant nécessite l'établissement d'un bilan en terme de quantité écoulée par le réseau et quantité ne rejoignant pas celui ci, sur la période d'observation considérée. C'est le rôle dévolue à la fonction de production, présentée précédemment, et qui est basée sur une modélisation de la composition surfacique du bassin versant. Quelque soit les principes de construction de toute fonction de production, elle fait nécessairement intervenir deux catégories de surfaces; les surfaces qui, quelque soit leur mode de recouvrement, alimentent par ruissellement, pour une pluie donnée, le réseau de drainage pour la période d'observation choisie, puis son complémentaire, les surfaces n'alimentant pas le réseau.

La complexité de l'organisation des surfaces urbaines en terme de ruissellement, la variété voire la variation des types de recouvrement, la relation de dépendance entre surface ruisselante et pluie<sup>28</sup>, interdisent quasiment une stricte approche déterministe pour modéliser la composition d'un bassin versant. Elle ne peut être reconnue comme un en-soi, sauf en des cas bien particulier; la modélisation de la composition d'un bassin versant est bâtie à partir des finalités de la modélisation hydrologique qui nécessite la prise en compte de cette composition.

A titre d'illustration, on peut évoquer deux grands types de finalités. Pour le premier, l'objectif est de reproduire ou prévoir l'hydrogramme aval autour de la pointe de débit. Le critère essentiel qui préside à la validation des modèles utilisés, concerne la valeur de débit maximale et sa position par rapport au début du phénomène qui le génère.

Pour le second, l'objectif est de reproduire ou prévoir le volume d'eau pluviale qui sera évacué par un réseau de drainage d'un bassin versant recevant une pluie donnée.

<sup>26</sup> Une étude fort intéressante sur le comportement des réseaux d'assainissement urbain, et prenant en compte l'effet de la structure du réseau sur la forme des débits évacués, a proposé l'utilisation du taux de maillage comme paramètre significatif de l'organisation d'un réseau; nombre de défluences sur nombre total de noeuds: Semsar Yazdi Ali, Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison des modèles de simulation hydrauliques des réseaux d'assainissement. Doctorat, INSA de Lyon, 1995, n° 95ISAL0025, 272p..

<sup>27</sup> La dimension de recouvrement s'obtient par une succession de pavages de l'espace considéré. Chaque étape est représentée par une mesure du pavage ( $u$ ) et un dénombrement des pavés ( $n(u)$ ) qui recouvrent au moins un élément de drainage. Si la relation entre nombre de pavés et taille du pavé est allométrique, quand cette taille varie,  $N(u)=a*u^D$ , la dimension de recouvrement du réseau est égale à  $D$ .

<sup>28</sup> Nous avons déjà évoqué ce point en disant que c'est la pluie, qui de part sa durée, ses intensités et leur distribution sur la durée de la pluie, l'état du système hydrologique, (antécédent pluviométrique, relations de voisinage entre surfaces perméables, surfaces imperméables et réseau de drainage etc.) configure in fine la surface "efficace" du bassin versant, entendue comme sa part qui contribue directement au ruissellement vers le réseau de collecte des eaux pluviales. Il est bien évident que cette dépendance entre pluie et surface efficace est plus ou moins forte selon les caractéristiques morphologiques du bassin. Une surface quasi imperméable est quasi efficace par rapport au phénomène considéré. Une surface faiblement imperméable présente une "efficacité" qui varie considérablement en fonction du type de pluie et en fonction de son état antérieur.

La nature de ces deux enjeux peut conduire à une appréciation différenciée de la composition d'un bassin versant. En effet, dans le premier cas, on peut présumer de la primauté des surfaces imperméables sur le restant, vis à vis de la production de la pointe de débit, si l'évènement pluvieux est suffisamment intense et d'une durée relativement modeste. Dans le second cas, on est conduit à ne pas négliger le rôle des surfaces perméables, si après saturation de l'infiltration et du stockage, le ruissellement qui s'y produit est repris par les surfaces imperméables en relation avec le réseau, ou directement par le réseau lui même.

Dans le premier de ces deux cas, la modélisation de la composition d'un bassin versant revient à ne tenir compte que des surfaces imperméables qui constituent la surface efficace par rapport au phénomène considéré; la modélisation de la composition d'un bassin versant se réduit à l'estimation de son coefficient d'imperméabilisation qui fait office de coefficient de ruissellement <sup>29</sup>.

Pour le second cas, la modélisation de la composition du bassin versant revient tout d'abord à définir l'enveloppe des surfaces potentiellement en relation avec le réseau de drainage, puis dans un second temps à les distribuer parmi un ensemble de catégories, chacune d'elles étant caractérisée par un modèle de production du ruissellement <sup>30</sup>. Il faut bien convenir que ce schéma, tout théorique, de la modélisation de la composition d'un bassin versant est fort délicat si ce n'est quasiment impossible à mettre en oeuvre de façon efficace, au regard du "coût" d'obtention de l'information.

Elle est pratiquement impossible dans le cas d'un projet, le bassin versant, par nature, n'étant connu qu'à travers certaines grandeurs urbanistiques, par ailleurs difficiles à relier aux paramètres utilisés par l'hydrologie urbaine; il peut être fait appel à la technique de simulation pour examiner les résultats obtenus à partir d'un champ d'hypothèses.

**5- Conclusion.** L'artificialité des réseaux de drainage urbain ne permet pas nécessairement l'emploi de la notion de bassin versant avec la rigueur qui la caractérise en hydrologie de surface: réseau ramifié, un seul exutoire, etc.. Cette notion reste cependant essentielle à la définition des grands principes d'organisation spatiale des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Elle préside toujours à l'usage d'un ensemble de formules et modèles hydrologiques, destinés à dimensionner un ouvrage, simuler son fonctionnement, etc..

La modélisation d'un bassin versant dérive des modèles hydrologiques qui sont amenés à en faire usage. La modélisation de son organisation et de sa composition est encore peu poussée. Généralement, ces deux caractéristiques sont représentées par des grandeurs globales; coefficient de forme, longueur du plus long chemin de drainage, surface totale, coefficient de ruissellement, pente moyenne, etc.. le choix d'une telle orientation en matière de modélisation répond également à un souci d'opérationnalité. En effet, on ne peut guère

<sup>29</sup> Le coefficient de ruissellement (C) a de multiples définitions. A titre d'illustration, nous n'en proposerons en ce texte qu'une. Connaissant la surface totale du bassin versant (A), estimée à partir de ses limites topographiques, la hauteur totale de pluie précipitée (H), le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant sur la période choisie (V), C est alors égal à  $V/(H*A)$ . On appelle alors surface efficace, la valeur  $C*A$ . Rappelons que l'assimilation du coefficient de ruissellement au coefficient d'imperméabilisation est prônée par l'Instruction technique aux réseaux d'assainissement des agglomérations, qui propose toujours l'utilisation de la formule de Caquot pour effectuer le dimensionnement des collecteurs drainant les bassins versants dont le coefficient d'imperméabilisation est au moins égal à 20% (Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations, Imprimerie Nationale, 1981).

<sup>30</sup> Pour les surfaces imperméabilisées, la modélisation de la production revient très fréquemment à négliger les phénomènes de rétention, de réévaporation. En ce qui concerne les surfaces perméables de nombreuses approches existent; usage d'un ensemble de valeurs forfaitaires représentant les pertes au ruissellement, usage de modèles dynamiques représentant la rétention, l'infiltration, etc.

développer des modèles dont la mise en oeuvre nécessiterait un "coût" prohibitif d'acquisition d'informations. Est-ce à dire que la modélisation de l'organisation et de la composition des bassins versants en restera en cet état? S'il est délicat voire présomptueux d'avancer une réponse certaine, on peut cependant présumer que le développement des systèmes d'information géographique, pourrait permettre, à terme, l'utilisation de modélisations moins globalisantes.

Enfin, rappelons que les caractéristiques morphologiques particulières des réseaux d'évacuation des eaux pluviales (maillage, exutoires multiples, etc..) tendent à rendre incertain l'utilisation de la notion de bassin versant telle qu'elle fut établie au cours du siècle passé; il se peut que la notion de bassin, au sens hydraulique du terme, soit à considérer avec le même intérêt.

## 6- **Bibliographie**

- \* *Encyclopédie de Diderot*, 18-ième siècle.
- \* *Encyclopaedia Universalis*, Paris, 1989, chapitre *Hydrologie*.
- \* Koch P., *Les réseaux d'égouts*, Dunod, Paris, 1954
- \* Dubreuil P., *Initiation à l'analyse hydrologique*, Paris 1974, 216p.
- \* Réméniéras G., *L'hydrologie de l'ingénieur*, Paris, Eyrolles, 1976,p.51
- \* Smart J.S. "Channel networks", *Advances in Hydrosociences*, 1972, vol8, p.305-346.
- \* Strahler (A.N.), "Quantitative Analysis of watershed géomorphology", *Trans. Am. Géophys. Union*, 1957, vol 38, n°6, p.913-920
- \* Thibault S., "Morphology and growth of urban technics networks: a fractal approach", *Revue Flux C.N.R.S.*, Juin 1995, 20p.
- \* Thibault S., *Modélisation morphofonctionnelle des réseaux d'assainissement à l'aide du concept de dimension fractale*. Thèse D.E., I.N.S.A. de Lyon, 1987, 303p
- \* Semsar Yazdi Ali, *Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison des modèles de simulation hydrauliques des réseaux d'assainissement*. Doctorat, INSA de Lyon, 1995, n° 95ISAL0025, 272p..
- \* *Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations*, Imprimerie Nationale, 1981
- \* *Mémento sur l'évacuation des eaux pluviales*, Service Technique de l'Urbanisme, Documentation française, Paris, 1989, 339p.
- \* Coste C; Loudet M., *Guide de l'assainissement en milieu urbain et rural*, Edition du Moniteur, Paris, tome1, 1991, 240p.
- \* Tardy Y., *le cycle de l'eau*, Masson, Paris, 1986, 338p.
- \* Roche M. F., "*Dictionnaire français d'hydrologie de surface*", Masson, Paris, 1986.
- \* Chocat, B., Seguin D., Thibault S., *Sciences et techniques de l'assainissement*, Edition C.N.F.P.T., 1982, Tomes 1 et 2, 320p.
- \* *Les eaux pluviales en milieu urbain*, Service technique de l'urbanisme, Paris, 1982, 31p.

## 7- **Traductions anglo-saxonnes.**

Bassin urbain: urban catchment, urban watershed (américain)

Bassin versant: Basin (en général), watershed (avec l'idée du contour, en américain), catchment (avec l'idée de la surface réceptrice), drainage basin, river basin (bassin fluvial).

Serge Thibault