

Notes de cours sur le débit maximum à l'exutoire d'un petit bassin versant

Université Nationale des Sciences, Technologies,
Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



PADONOU G. Tankpinou
Novembre 2023

Chapitre IX : Débit Maximum à l'exutoire d'un Petit Bassin Versant

A Méthode Rationnelle

Le temps de concentration (T_c) en amont du point où s'effectue le calcul dans le bassin versant est le concept de base de la méthode rationnelle. Trois hypothèses sont faites dans la validation de cette méthode.

le débit de pointe ne peut être observé que si l'averse a une durée plus ou moins égale au temps de concentration. C'est-à-dire que la totalité du bassin contribue à la formation du débit de pointe.

le débit de pointe est proportionnel à l'intensité moyenne maximale de l'averse déterminée avec un intervalle de temps égal au temps de concentration

le débit de pointe a la même période de retour T que l'intensité im qui le provoque. Ceci suppose le coefficient de ruissellement C soit constant.

La méthode rationnelle est très utilisée pour sa simplicité. En supposant une pluie qui tombe sur une surface élémentaire, la formule rationnelle s'écrit dans son expression la plus simplifiée :

$$Q = \frac{1}{360} C \times i_m \times A \quad \text{éq IX-1}$$

Où :

C , est le coefficient de ruissellement, il traduit le fait qu'une partie de l'eau précipitée ne parvienne pas à l'exutoire (pertes au ruissellement) ;

i_m est l'intensité de la pluie exprimée en mm/h : plus la pluie est intense et plus le débit sera important ;

A est la surface réceptrice (ou bassin versant) exprimée en hectare, en supposant que la pluie tombe sur toute cette surface, influence le débit à l'exutoire.

Le débit est exprimé en m³/s. L'apport pluvial d'une plateforme routière est évalué par cette méthode. Le temps de concentration est généralement évalué par la formule du service routier de Californien

$$(t_c = 0,0195 \times L^{0,77} \times I^{0,385})$$

Avec t_c le temps de concentration en minute ; L est la longueur hydraulique (parcours de l'eau) en mètre ; I est la pente selon le parcours de l'eau en mètre par mètre.

A.1 Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est le rapport :

$$C = \frac{\text{volume ruisselé (parvenant à l'exutoire de la surface réceptrice)}}{\text{volume précipité (surface réceptrice)}}$$

Le coefficient de ruissellement encadré par les valeurs extrêmes 0 et 1, est en fait très difficile à estimer. Pour l'estimer, il existe plusieurs approches.

Dans le cas où la nature de la surface du bassin versant est homogène, on applique des valeurs forfaitaires proposées par de nombreux tableaux plus ou moins détaillés et précis.

Tableau IX-1 : Coefficient de ruissellement selon le type de surface [Satin, Selmi, 1999]

Nature de la surface	Coefficient C
Pavage, chaussée revêtue, piste ciment	$0,70 < C < 0,95$
Toitures et terrasses	$0,75 < C < 0,95$
Sols imperméables avec végétation	
$I < 2\%$	$0,13 < C < 0,18$
$2\% < I < 7\%$	$0,18 < C < 0,25$
$7\% < I$	$0,25 < C < 0,35$
Sols perméables avec végétation	
$I < 2\%$	$0,05 < C < 0,10$
$2\% < I < 7\%$	$0,10 < C < 0,15$
$7\% < I$	$0,15 < C < 0,20$

Tableau IX-2 : Coefficient de ruissellement selon le type d'occupation du sol [Satin, Selmi, 1999]

Type d'occupation de sol	Coefficient C
Commercial	$0,70 < C < 0,95$
Résidentiel	
Lotissement	$0,30 < C < 0,50$
Collectif	$0,50 < C < 0,75$
Habitat dispersé	$0,25 < C < 0,40$
Industriel	$0,50 < C < 0,80$
Parcs et jardin	$0,05 < C < 0,25$
Terrains de sports	$0,10 < C < 0,30$
Terrain vague	$0,05 < C < 0,15$
Terrains agricoles	
Drainés	$0,05 < C < 0,13$
Non drainés	$0,03 < C < 0,07$

Tableau IX-3 : Coefficient de ruissellement d'après Bourrier, 1997

Désignation des zones (d'après les catégories d'urbanisation)	Nature du sol			Facteur correctif en fonction de la pente de la zone	
	léger (1)	moyen (2)	lourd (3)	terrain plat <1%	terrain pentu >7%
Zone agglomérée, secteur dense, centre ville - 160 logts/Ha	0.85	0.9	0.9	0.95	1.05
Secteur diffus, centre de quartier - 110 à 150 logts/Ha	0.75	0.8	0.8	0.95	1.05
Banlieue de métropole - 60 à 100 logts/Ha	0.5	0.55	0.6	0.9	1.1
Banlieue éloignée, semi-collectif et pavillons en bande - 40 à 60 logts/Ha	0.4	0.45	0.5	0.9	1.2
Zone pavillonnaire (parcelle de 400m²) - 20 à 30 logts/Ha	0.3	0.35	0.4	0.9	1.2
Zone résidentielle - 18 à 40 logts/Ha	0.25	0.35	0.4	0.9	1.2
Zone pavillonnaire grand standing - 15 à 20 logts/Ha	0.2	0.3	0.35	0.9	1.2
Village rural traditionnel	0.15	0.2	0.25	0.75	1.25
Zone d'habitat de très faible densité - 1 à 5 logts/Ha	0.08	0.1	0.15	0.75	1.25
Zone d'habitat très ancien	0.4	0.5	0.6	0.9	1.2
Zone industrielle et artisanale	0.4	0.5	0.7	0.9	1
Zone industrielle lourde	0.6	0.7	0.8	0.95	1
Zone portuaire	-	0.8	-	0.95	1
Gare routière et entrepôts	0.75	0.8	0.85	0.95	1
Gare et entrepôt ferroviaire	0.15	0.2	0.3	0.75	1
Services publics : hôpital, centre administratif et zone d'équipement	-	0.85	-	0.95	1.05
Centre de repos et hospitalier, zone d'équipement à dominante verte	0.25	0.45	0.6	0.95	1.1
Centre hôtelier et commercial	0.65	0.7	0.8	0.9	1.1
Terrains de sport, terrain de jeux	0.2	0.3	0.35	0.9	1.1
Aérodrome et terrain militaire	0.15	0.3	0.45	1	1.1
Cimetière urbain	0.3	0.4	0.5	0.75	1.25
Entreprise ferroviaire	0.08	0.1	0.15	0.9	1
Emprise autoroute	0.5	0.6	0.65	0.95	1
Emprise route nationale et chemin départemental	0.3	0.4	0.6	0.8	1
Emprise voie urbaine rapide	-	0.8	0.8	1	1
Emprise autres voies urbaines	-	0.9	-	1	1
Emprise échangeurs et carrefours	0.4	0.5	0.6	1	1
Chaussées et parkings	-	0.8	-	0.95	1
Dallage béton	-	0.9	-	0.95	1.05
Pavage serré ou joint coulé	-	0.75	-	0.9	1.1
Pavage large joint sable	0.55	0.6	0.7	0.9	1.1
Circulation piétonne -voies en macadam- accotement stabilisé	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1
Allée en gravier	0.3	0.35	0.45	0.9	1.1
Espaces verts - zone de loisir	0.1	0.15	0.25	0.75	1.25
Espaces libres - zone de dégagement et zone non aedificandi	0.1	0.15	0.2	0.75	1.25
Zones boisée urbaine, parcs et jardins	0.05	0.1	0.15	0.5	1.25
Forêts, bois et landes	0.01	0.04	0.08	0.5	1.2
Terrain de culture - céréales	0.06	0.08	0.1	0.75	1.25
Prés et pâturages	0.05	0.07	0.08	0.66	1.25
Carrières ou mines	0.2	-	0.5	0.9	1.25
Terrains nus (sans végétation, ni culture)	0.04	0.15	0.3	0.5	1.5

(1) Sols sableux, graveleux ou très perméables. (2) Terrains ordinaires courants. (3) Sols argileux, rocheux, peu perméables.

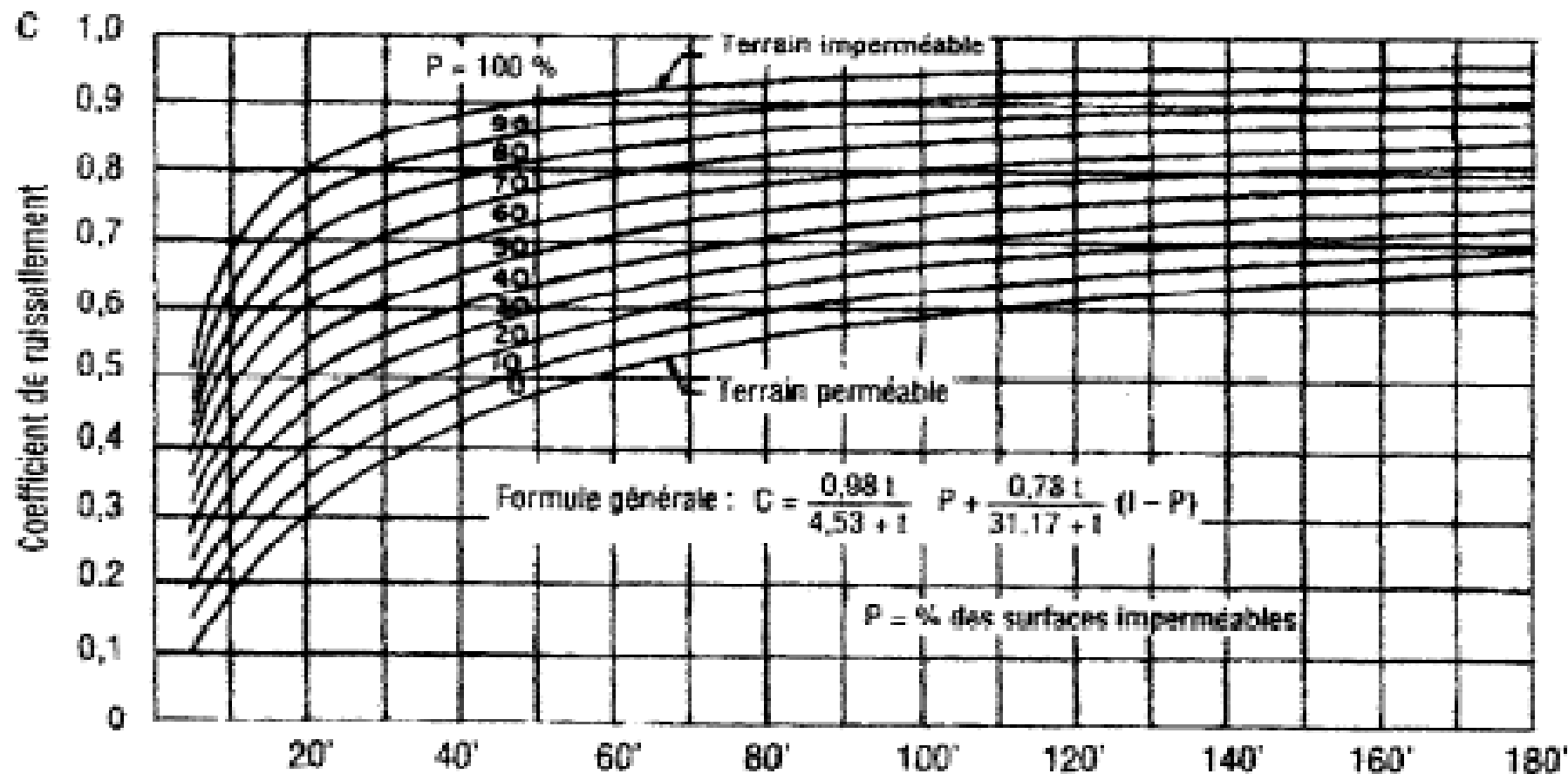


Figure IX-1 : Valeurs du coefficient de ruissellement en fonction du temps écoulé à partir du commencement de la précipitation [Bourrier, 1997]

Les pertes au ruissellement sont maximales au début de la pluie (sol sec, dépressions du sol vides, . . .) et tendent à diminuer progressivement (saturation du sol, remplissage des dépressions, . . .) avec la durée de la pluie. Donc accroissement du coefficient de ruissellement. Généralement le volume d'eau de pluie est plus important quand la période de retour est plus grande. Donc le coefficient de ruissellement est plus grand. Pour des périodes de retour très élevées, Il est préférable de surestimer les coefficients de ruissellement précédents.

Lorsque la surface en jeu est composée de surfaces élémentaires homogènes (A_j) de coefficients de ruissellement élémentaires (C_j), le coefficient de ruissellement (C) de la surface totale est estimé par l'expression :

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \times C_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad \text{éq IX-2}$$

Les C_j coefficients sont estimés d'après les tableaux et figures précédents.

Le coefficient de ruissellement (C), peut être estimé par des formules empiriques de type

$C = (a \times IMP) + (b \times I) + c$ établies par des mesures faites sur des bassins expérimentaux. Ces formules ne sont généralement valables que pour les bassins où elles ont été calées et leur extrapolation à d'autres bassins versants est souvent hasardeuse. Ici :

$a; b; c$ sont des coefficients de calage ;

IMP est le rapport des surfaces imperméables à la surface totale ;

I est la pente moyenne du bassin versant.

Le coefficient de ruissellement (C), peut aussi être estimé par la Mise en œuvre de méthodes statistiques, qui consistent à appliquer sur un plan (ou une photographie aérienne) de la surface où il faut estimer le coefficient de ruissellement, une feuille calque munie de points répartis de façon aléatoire. La densité des points dépend de l'échelle du plan (ou de la photographie) et de la précision recherchée sur l'estimation du coefficient de ruissellement. On compte ensuite le nombre de points dans chaque surface élémentaire type et un simple calcul pondéré permet de connaître la surface de chaque type d'occupation du sol.

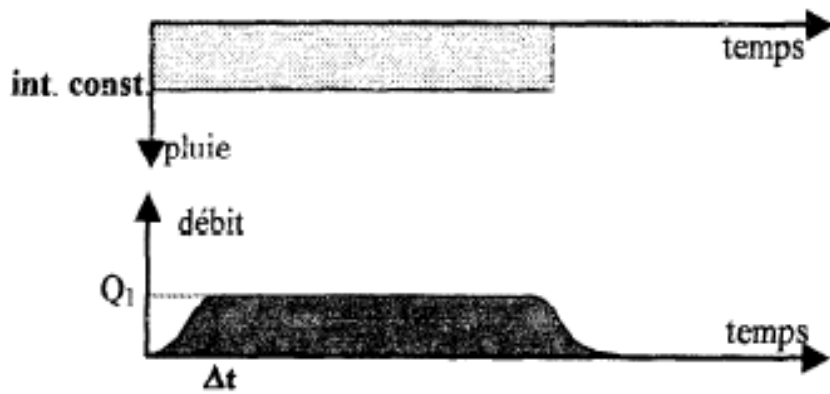
A.2 L'intensité de la pluie

Il s'agit en fait de choisir une pluie de projet, dont le ruissellement (le débit à l'exutoire) pourra être estimé par la formule rationnelle. La pluie de projet retenue ici est à une pluie d'intensité constante. Le problème revient alors à en choisir l'intensité.

Choisissons un pas de temps Δt . Découpons le bassin versant en surfaces isochrones pour des intervalles de temps Δt :

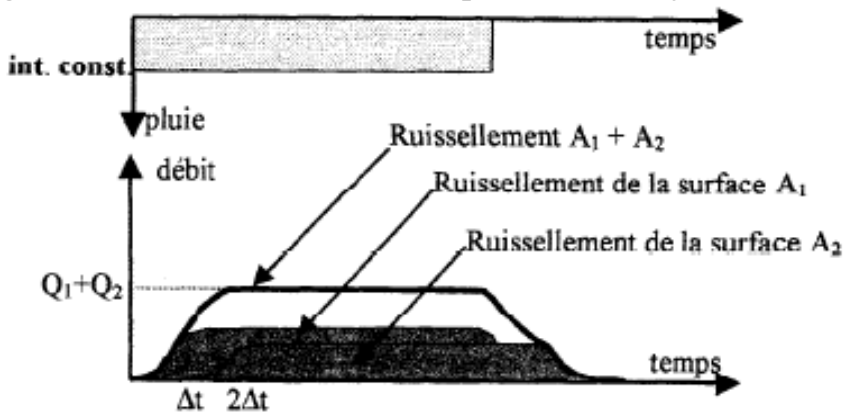
- l'eau qui tombe sur la surface A_1 , la plus proche de l'exutoire, parviendra à l'exutoire entre les instants 0 et Δt ;
- l'eau qui tombe sur la surface A_2 parviendra à l'exutoire entre les instants Δt et $2\Delta t$;
- l'eau qui tombe sur la surface A_n parviendra à l'exutoire entre les instants $(n - 1)\Delta t$ et $n\Delta t$;

A titre d'exemple, supposons une pluie très longue et considérons un bassin versant décomposé en 2 surfaces isochrones ; dans un premier temps, voyons ce qui se passe avec la surface A_1 Au bout de l'instant Δt , toute la pluie ruisselle 'en nappe' sur la surface A_1 et le débit à l'exutoire devient constant égal à Q_1 .



Ruissellement de la surface A_1

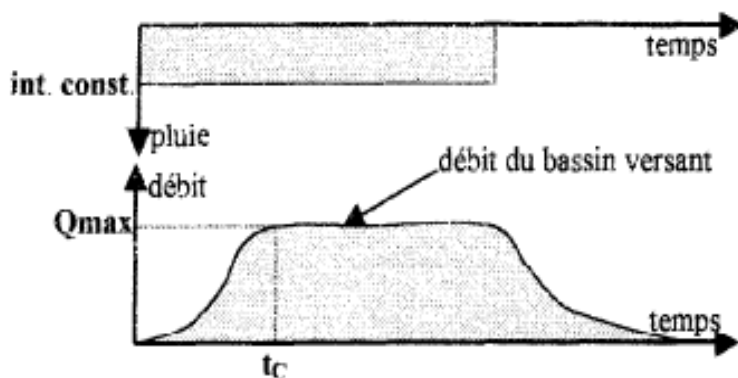
On peut considérer le même phénomène avec la surface A_2 . Au bout de $2\Delta t$, cette surface génèrera un débit constant Q_2 qui viendra s'ajouter au débit Q_1 .



Ruissellement des surfaces A_1 et A_2

Considérons maintenant la surface totale A décomposée en n surfaces isochrones, tous les débits élémentaires des surfaces A_i s'additionneront et le débit de la dernière surface contributive à A , parviendra totalement à l'instant $n\Delta t$ (qui correspond au temps de concentration du bassin versant) et le débit se stabilisera alors à une valeur maximale $Q_{max} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$.

Le temps de concentration t_c d'un bassin versant généralement noté t_c correspond au temps que met une goutte d'eau tombée à l'endroit hydrauliquement le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant pour parvenir à l'exutoire.



A.3 Le temps de concentration t_c

Le débit à l'exutoire d'un bassin versant sera inférieur au débit maximal Q_{max} précédemment obtenu, lorsque la durée de pluie de projet est inférieure au temps de concentration t_c du bassin versant. En effet, dans ce cas, toute l'eau qui est tombée sur la surface A_1 aurait cessée de ruisseler à l'exutoire du bassin versant, lorsque l'eau tombée et qui ruisselle sur la surface A_n parviendra à l'exutoire.

Pour le temps de concentration t_c , pour choisir la valeur constante de l'intensité de la pluie, nous considérons les ajustements IDF, que nous avons réalisés, qui fournissent, pour la durée t_c , une intensité moyenne de période de retour T choisie. Nous considérons alors que la période de retour du débit alors calculé est la même que celle de la pluie.

Il faut remarquer pour une période de retour T choisie, que plus la durée de la pluie augmente et plus l'intensité diminue. Donc éviter que la durée de pluie soit supérieure au temps de concentration t_c pour lequel, on a le débit maximal calculé par la formule rationnelle. Nous avons :

$$Q_{max} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum Q_j$$

$$\text{Or } Q_j = C_j \times i \times A_j$$

$$Q_{max} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum C_j \times i \times A_j = i \times \sum A_j \times \frac{\sum C_j \times A_j}{\sum A_j}$$

$$Q_{max} = i \times \sum A_j \times \frac{\sum C_j \times A_j}{\sum A_j} = i \times A \times C$$

$$\text{Avec } C = \frac{\sum C_j \times A_j}{\sum A_j}$$

Dès lors que l'intensité de la pluie est constante, On peut donc s'abstenir de définir les surfaces isochrones et considérer simplement la surface totale.

On peut alors écrire la formule rationnelle au niveau d'un bassin versant avec une pluie de projet à intensité constante de façon plus explicite :

$$Q(T) = C \times i(t_c, T) \times A$$

Où : T est la période de retour choisie et t_c le temps de concentration du bassin versant.

Remarques

La méthode rationnelle peut s'étendre à une forme de pluie quelconque. Il suffit de calculer à chaque pas de temps, les débits générés par chaque surface isochrone à l'exutoire du bassin versant et de cumuler ces débits. La grande difficulté est d'estimer les surfaces isochrones pour un bassin versant quelconque.

Le temps de concentration

$$t_c = \max(t' + t'')$$

Sur le plan pratique, ce temps peut être mesuré à l'aide de traceurs injectés dans l'eau (ex : fluorescéine).

Pour estimer le temps de concentration (t_c), il existe une variété de formules empiriques, dont la validité reste théoriquement limitée à l'échantillon qui a servi pour le calage. Or, ces formules empiriques sont établies pour des bassins versants peu urbanisés, voire plutôt ruraux. Il se pose le problème de leur emploi en hydrologie urbaine.

A.4 Exemples

A.4.1 Méthode de l'onde cinématique

Le temps de concentration t_c d'un bassin uniformément incliné est :

$$t_c = \frac{6,9}{i_e^{0,4}} \left[\frac{L}{K_s \sqrt{S_0}} \right]^{0,6} \quad \text{éq IX-3}$$

Avec

t_c en mn

i_e l'intensité de pluie effective en mm /h

L la longueur du plan incliné en m

S_0 la pente du plan incliné en m /m

K_s le coefficient de rugosité de Strickler

A.4.2 Formule de Giandotti

$$t_c = 60 \times \frac{1,5L + 4\sqrt{S}}{0,8 \times \sqrt{Z_{moy} - Z_{min}}} \quad \text{éq IX-4}$$

t_c en mn

L la longueur du chemin hydraulique le plus long en km

S la superficie du bassin versant en km²

Z_{moy} et Z_{min} sont les altitudes moyenne et minimale du bassin versant en m

Il semble que la formule de Giandotti donne plutôt le temps de montée que nous considérons ici comme temps de concentration.

A.4.3 Formule de Kirpich [Chocat, 1997]

Pour des bassins de surface comprise entre 0,4 et 45,3 ha

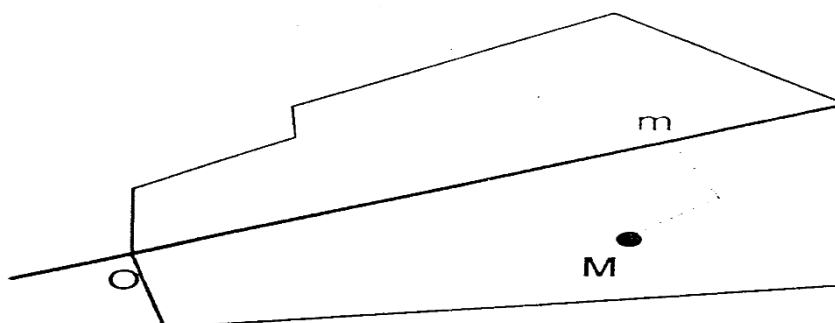
$$t_c = 0.01947 \times \frac{L^{0.77}}{I^{0.385}} \quad \text{éq IX-5}$$

t_c est le temps de concentration en minute

L est la longueur du plus long thalweg du bassin en mètre

I est la pente en m / m

Il faut remarquer que cette formule sous-estime le temps de concentration par rapport aux autres formules.



Pour un même bassin versant les résultats obtenus par ces formules peuvent différer. C'est pourquoi, pour la mise en œuvre de la méthode rationnelle, on peut utiliser une méthode plus physique (mais qui fait aussi appel à des relations empiriques). On décompose le temps de concentration t_c en deux temps.

La goutte d'eau tombée en un point M du bassin versant : ruisselle selon le trajet Mm (gouttières, caniveaux...) pendant un temps t_s de ruissellement en surface avant de rejoindre le réseau d'assainissement ou le talweg principal et s'écoule dans le collecteur entre les points m et O pendant un temps t_r temps de ruissellement en réseau (ou dans le talweg principal) jusqu'à l'exutoire.

La durée totale de l'écoulement est $t = t_s + t_r$

La durée maximale d'écoulement dans le bassin est appelée temps de concentration (t_c).

$$t_c = \max(t_s + t_r)$$

Sur le plan pratique, ce temps peut être mesuré à l'aide de traceurs injectés dans l'eau (ex : fluorescéine).

t_s et t_r sont indépendamment estimés.

Cette méthode se justifie bien pour un bassin versant équipé d'un réseau où on peut effectivement bien distinguer ces deux types d'écoulement.

A.5 Estimation du temps de ruissellement en surface (t_s)

A.5.1 Selon [Nonclerc, 1982] :

- dans les agglomérations urbaines, de l'ordre de 5 mn ;
- dans les agglomérations semi-urbaines, de l'ordre de 5 à 15 mn ;
- pour les terrains non bâtis, les cultures, les bois, à partir d'une vitesse d'écoulement V sur les versants donnée par la formule : $V = (1 \text{ à } 1,5) \times C \times \sqrt{I}$

Où C : coefficient moyen de ruissellement ; I : pente moyenne du terrain en m/m.

A.5.2 Selon [OMS, 1992]

- 15 mn pour des bassins versants de surface inférieure à 5 ha ;
- 15 mn pour des bassins versants jusqu'à 20 ha avec une pente moyenne supérieure à 0,5%
- Pour des bassins versants jusqu'à 20 ha avec une pente moyenne inférieure à 0,5%, on prend un temps de base de 15 mn auquel on rajoute 1 mn par hectare additionnel à 5ha.

A.5.3 Selon [ENPC, 1978]

- 5 mn dans les agglomérations d'habitat très dense ;
- 10 à 15 mn dans les agglomérations d'habitat dense à faible pente ;
- 20 à 30 mn dans les zones d'habitat lâche, de type résidentiel.

Dans tous les cas, il conviendra de se référer au terrain afin d'ajuster au mieux ces valeurs.

A.6 Estimation du temps de ruissellement dans le réseau (t_r)

Un processus de résolution itérative est utilisé pour un réseau non existant donc en projet. t_r dépend des dimensions du réseau, qui dépendent de la pluie de projet élaborée, qui dépend du temps de concentration t_c (donc de t_r qui dépend des dimensions du réseau, etc.)

Le processus itératif est le suivant (après avoir établi un plan du réseau et calculé t_s) :

On estime un t_r , ce qui permet de calculer $t_c = t_s + t_r$;

On calcule alors le débit à évacuer par la formule rationnelle.

Ceci nous permet de dimensionner un réseau d'évacuation (voir le dimensionnement plus loin). Ce dimensionnement fournit un nouveau t_r et on recommence jusqu'à convergence. Cette valeur de t_r peut être évaluée par :

$$t_r = \sum_j \frac{lt_j}{V_j} \quad \text{où} \quad \begin{cases} lt_j \text{ est la longueur du } j^{\text{ème}} \text{ tronçon de pente uniforme} \\ V_j \text{ est la vitesse moyenne d'écoulement dans ce tronçon} \end{cases}$$

La vitesse V_j peut être estimée par le rapport.

$$Q/S_j \quad \text{où } Q \text{ est le débit et } S_j \text{ la section d'écoulement du tronçon } j$$

A.7 La période de retour (T)

Elle permet de fixer « la protection » que devra offrir les ouvrages d'assainissement et aussi les coefficients de formules d'ajustement des courbes IDF.

Pour les réseaux d'assainissement pluviaux on choisit souvent $T = 10$ ans. De plus en plus la tendance est à la différenciation en fonction des zones à protéger de la période de retour (T). On associe souvent le risque encouru avec la période de retour. Le risque doit être défini comme la rencontre entre un événement perturbateur (la pluie) et un élément vulnérable (la zone urbaine à protéger). Alors on estime la période de retour à :

Inférieure 5 ans par exemple pour les zones peu vulnérables (en périphérie, peu habitées, sans valeurs économiques,...);

- de 5 à 10 ans pour les zones vulnérables (zone commerciale, industrielle, ...);
- égale ou supérieure à 10 ans pour les zones très vulnérables (centre-ville, ...)

Par ailleurs, les ajustements statistiques des courbes IDF sont souvent définis pour T égal à 10 ans et on ne dispose pas toujours d'ajustement pour $T \neq 10$ ans (surtout pour $T > 10$ ans).

Le tableau qui suit, permet, à partir du calcul de Q pour $T = 10$ ans, d'extrapoler le débit à d'autres périodes de retour.

Tableau IX-4 : Rapport du débit d'une période de retour T au débit décennal

Période de retour T	Valeur du rapport $Q(T)/Q(T = 10 \text{ ans})$
3 mois	0,24
6 mois	0,34
1 an	0,45
2 ans	0,57
5 ans	0,80
10 ans	1,00
20 ans	1,25
50 ans	1,60
100 ans	2

Enfin, les considérations économiques interviennent aussi dans le choix de la période de retour dans la mesure où une protection de période de retour élevée entraînera des coûts plus élevés pas forcément compatibles avec les possibilités financières.

B Méthode superficielle de CAQUOT

L'ingénieur CAQUOT vers 1940, propose une méthode (qui porte son nom) pour pallier aux insuffisances de la méthode rationnelle. Notamment la prise en compte de la variation de l'intensité (distribution spatiale des précipitations), l'estimation souvent laborieuse du temps de concentration et surtout de l'effet de stockage de l'eau dans le bassin versant.

Sachant que temps de concentration du bassin versant dépende du débit (donc de la période de retour choisie). Le débit maximum sera atteint lorsque t est égal à t_c .

le volume ruisselé (V_{ru}) en m^3 entre les instants 0 et t_c est donné par l'expression :

$$V_{ru} = 10 \times H \times A \times C \times \alpha \quad \text{éq IX-6}$$

Avec

H : hauteur d'eau précipitée en mm pendant t_c ;

A : Surface du bassin versant en Hectare;

C : Coefficient de ruissellement ;

α : Coefficient d'abattement spatial de la pluie qui est une fonction de la Surface A du bassin versant. Notons $\alpha = A^{-\varepsilon}$

On fait les hypothèses que :

le volume stocké (V_{sto}) en m^3 dans le réseau est proportionnel au débit maximal Q que l'on observe à l'instant t_c .

le volume écoulé ($V_{éco}$) en m^3 à l'exutoire du bassin versant jusqu'à l'instant t_c est proportionnel au débit maximal Q que l'on observe à l'instant t_c

$$\begin{cases} V_{sto} = 60 \times \delta \times t_c \times Q \\ V_{éco} = 60 \times \beta \times t_c \times Q \end{cases}$$

Avec

δ et β : coefficients d'ajustement ($\delta < 1$ et $\beta < 1$);

t_c : Temps de concentration en minute ;

Q : Débit maximal en m^3/s .

Le bilan volumétrique s'écrit : $V_{ru} = V_{sto} + V_{éco}$

Il vient que :

$$Q = \frac{1}{6} \times \frac{H}{t_c} \times \frac{C \times A^{1-\varepsilon}}{\beta + \delta} \quad \text{éq IX-7}$$

$\frac{H}{t_c}$: Intensité moyenne en millimètre /minute de la pluie pendant le temps t_c . Soit pour une période

de retour T ; $i(t_c, T) = \frac{H}{t_c} = a(T) t_c^{b(T)}$.

Le temps de concentration t_c en minute peut-être estimé par une relation du type :

$$t_c = \mu(M) \times I^c \times A^d \times Q^f$$

où

μ : coefficient fonction de M

$M = \frac{L}{\sqrt{A}}$: Allongement du bassin versant ; L est le plus long chemin hydraulique et A la surface du bassin versant.

I : Pente moyenne en mètre / mètre du réseau d'assainissement ;

A : Surface en hectare du bassin versant ;

Q : Débit maximum en mètre cube par seconde à l'exutoire du bassin versant.

Lorsque nous remplaçons chaque terme par sa valeur, nous constatons que le débit de pointe (débit à l'exutoire) est fonction de cinq variables (A, C, I, L, T) et de neuf paramètres répartis comme suit :

a, b, ε paramètres de la pluie. a et b (paramètres de MONTANA) sont des fonctions de la période de retour T selon les courbes IDF (prendre les valeurs de INT 77). L'abattement spatial ε est une fonction du temps de concentration t_c . (pour les surfaces de 100 à 200 ha et des temps de concentration de l'ordre de 30 mn, prendre $\varepsilon = 0,05$; pour les surfaces inférieures à 100 Ha, prendre $\varepsilon = 0,03$) De manière générale, la valeur $\varepsilon = 0,05$ a été adoptée par les INT 77, Ceci correspond à une majoration de Q pour $t_c < 15$ mn et à une minoration de Q pour $t_c > 30$ mn.

$\beta + \delta$ caractérisant le mode de transformation de la pluie en débit. Les INT 77 retiennent la valeur moyenne $\beta + \delta = 1,1$ après analyse des hydro-grammes observés sur les petits bassins expérimentaux ($A < 5$ ha), qui a conclu à la variation de $\beta + \delta$ entre les valeurs extrêmes de 0,63 et 1,53 pour un même bassin.

μ , c, d, f caractérisant le bassin versant. Les INT 77 retiennent des valeurs pour des bassins versants homogènes ayant une superficie inférieure à 200 Ha

$$\mu = 0,50 \text{ ou } \mu = 0,28 \times M^{0,84}$$

$$C = -0,41 ; d = 0,507 \text{ et } f = -0,287$$

Observons que, A est la surface drainée en amont du point où l'on effectue le calcul du débit Q. La pente moyenne I du bassin versant est la pente moyenne au sens hydraulique. Elle se calcule selon le plus long parcours de l'eau (L) correspond au temps de concentration t_c dans le bassin versant. Si L, est décomposée en tronçons L_j de pente I_j , on écrira :

$$L = \sum L_j \quad \text{et} \quad T_c = \sum T_j = \sum \frac{L_j}{V_j}$$

Où V_j est la vitesse moyenne sur le tronçon j est donnée par la formule de Chézy :

$$V_j = C_j \times \sqrt{R_{Hj} \times I_j} \quad (\text{hypothèse de l'écoulement uniforme})$$

C_j , I_j , R_{Hj} sont respectivement le coefficient de ruissellement, la pente de fond uniforme et le rayon hydraulique sur le tronçon j ;

Un écoulement est dit « uniforme » lorsque les paramètres géométriques (sections transversales et pentes), les paramètres hydrauliques (notamment vitesse du fluide) et la rugosité des parois et du fond sont tous constants. Sur le profil en long de l'ouvrage, l'on observe ce type d'écoulement loin des extrémités et des singularités, et la hauteur correspondante à un débit donné s'appelle hauteur normale ou encore tirant d'eau normal. Elle se calcule par une formule du type Manning-Strickler :

$$Q = K_S \times S \times R_H^{2/3} \times \sqrt{I}$$

C Domaine de validité et précision de la méthode de CAQUOT

Les INT 77 (France) sont applicables à des bassins assez homogènes. Elles proposent en effet des valeurs moyennes pour les paramètres ε , $\beta + \delta$, μ , c, d, et f qui correspond aux observations faites sur les bassins de référence (par l'université de Montpellier.) Le domaine de validité est donc défini par les caractéristiques de ces bassins de référence, c'est à dire :

- limitation de la surface d'assemblage des bassins élémentaires à 200 hectares
- le coefficient de ruissellement doit évoluer entre 0,20 et 1
- les pentes doivent être comprises entre 0,2 % et 5 %

- pour l'assemblage de bassins élémentaires, le rapport de la pente maximale à la pente minimale ne doit pas dépasser 20.
- les paramètres pluviométriques sont connus à 10 % près ; les variables A, C, M sont déterminées de 15 à 30 % près.

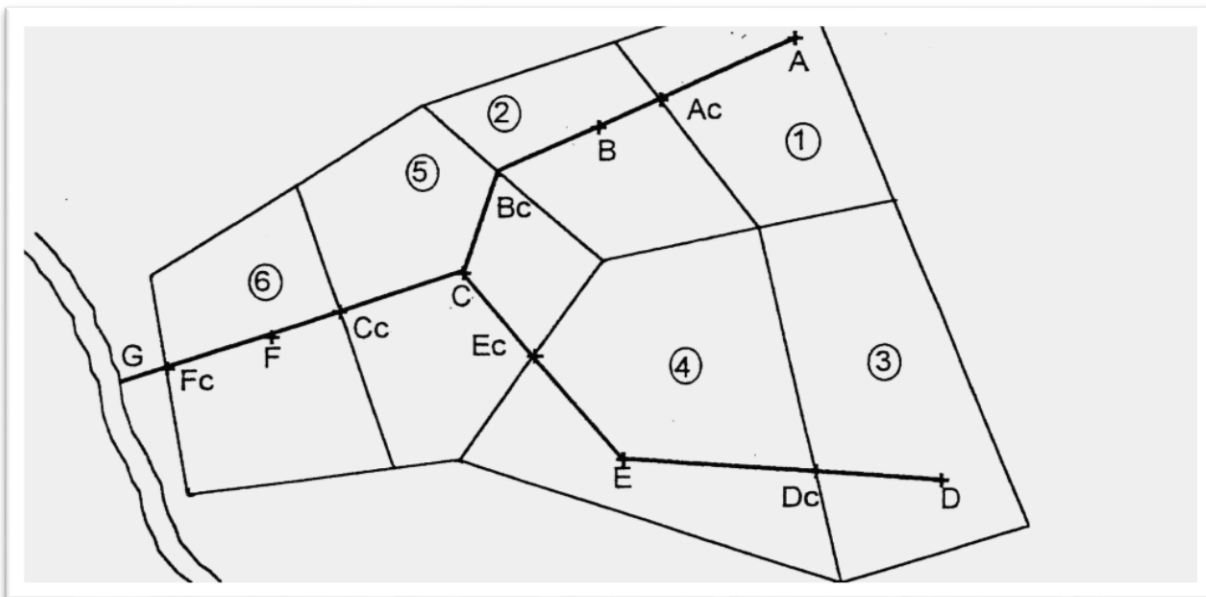
Il en résulte sur le calcul du débit de pointe Q_p une précision comprise entre 20 et 40 %. Un coefficient correcteur m , déduit du coefficient d'allongement du bassin M est appliquée au calcul des débits, pour tenir compte de la forme plus ou moins ramassée des sous-bassins.

La structure du réseau (assemblage en série ou en parallèle) influe sur Le calcul des débits est effectué pour chaque sous bassin puis dans chaque branche du réseau. La formule de CAQUOT permet de recalculer sur un bassin équivalent au groupement de ces bassins, le débit résultant. Les paramètres A_{eq} (surface équivalente), C_{eq} (Coefficient de ruissellement équivalent), I_{eq} (pente équivalente) et M_{eq} (allongement équivalent) sont obtenus à partir des caractéristiques des bassins élémentaires.

Le point caractéristique, qui servira à la délimitation des bassins élémentaires, se situe au 5/9 de la longueur du collecteur à partir de l'amont pour les bassins de tête et à la moitié du tronçon pour les autres bassins (bassins de parcours).

Un tronçon de collecteur est défini en fonction du tracé de ces collecteurs et des pentes du terrain. Chaque nœud du collecteur correspond à une extrémité de tronçon. Chaque tronçon doit avoir une longueur raisonnable inférieure ou égale à 250m. Chaque tronçon se calcule à partir de son point caractéristique et du débit transité en son point caractéristique car la partie amont est excédentaire alors que la partie aval est sous-estimée.

D Groupement des bassins



D.1 Groupement en série

Sur le schéma ci-dessus les bassins B1 et B2 sont en série.

Au point B_c : l'hydrogramme du bassin 1 arrive décalé du temps de parcours TAB et amorti par les pertes de charge sur le parcours A_cB_c. il se combine avec l'hydrogramme du bassin 2 au point BC. il en résulte l'hydrogramme permettant d'obtenir le débit de pointe Q_p au point B_c. Dans le modèle de CAQUOT ce débit de pointe Q_p est déterminé en considérant le bassin équivalent $B_{12} = B_1 + B_2$ dont les caractéristiques sont les suivantes :

La surface totale drainée en amont du point BC est $A_{12} = A_1 + A_2$

Le coefficient de ruissellement est : $C_{12} = \frac{C_1 A_1 + C_2 A_2}{A_{12}}$

La pente I_{12} , dans le cas où $L_{12} = L_1 + L_2$ est calculée selon le parcours le plus long

$$I_{12} = \left(\frac{L_{12}}{\frac{L_1}{\sqrt{I_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{I_2}}} \right)^2 \quad \text{et} \quad M_{12} = \frac{L_{12}}{\sqrt{A_{12}}}$$

De façon générale les caractéristiques du bassin équivalent se déterminent par :

Surface	Coefficient de Ruissèlement	Pente	Allongement
$A_{eq} = \sum A_j$	$C_{eq} = \frac{\sum C_j \times A_j}{\sum A_j}$	$I_{eq} = \frac{(\sum L_j)^2}{\left(\sum \frac{L_j}{\sqrt{I_j}} \right)^2}$	$M_{eq} = \frac{\sum L_j}{\sqrt{\sum A_j}}$

D.2 Groupement en parallèle

Après décalage et amortissement, les hydrogrammes respectifs, des bassins B12 et B34 en parallèle se combinent au nœud C. Le bassin équivalent B14 permet de déterminer le débit de pointe au nœud C. les caractéristiques du bassin équivalent B14 sont :

la surface A_{14} avec $A_{14} = A_{12} + A_{34}$

le coefficient de ruissellement $C_{14} = \frac{C_{12} A_{12} + C_{34} A_{34}}{A_{14}}$

la pente moyenne $I_{14} = \frac{I_{12} Q_{12} + I_{34} Q_{34}}{Q_{12} + Q_{34}}$

le plus long chemin hydraulique L_{14} est déterminé par le débit maximal.

Par conséquent,

$$L_{14} = L_{12} \quad \text{si} \quad Q_{12} > Q_{34} \quad \text{et} \quad M_{14} = \frac{L_{14}}{\sqrt{A_{14}}}$$

Des anomalies résultent de ce modèle de propagation des hydrogrammes. Il peut arriver que pour les bassins en série, que le débit de pointe Q_p du bassin équivalent soit inférieur au maximum des débits de pointes Q_{PJ} des bassins composant le bassin équivalent. Dans ce cas on prendra :

$$Q_p = \max(Q_{PJ})$$

Dans le cas des bassins en parallèle il peut arriver que $Q_p > \sum(Q_{PJ})$ ce qui est impossible. Prendre dans ce cas, $Q_p = \sum(Q_{PJ})$.

De façon générale les caractéristiques du bassin équivalent se déterminent par :

Surface	Coefficient de Ruissèlement	Pente	Allongement
$A_{eq} = \sum A_j$	$C_{eq} = \frac{\sum C_j \times A_j}{\sum A_j}$	$I_{eq} = \frac{\sum I_j \times Q_j}{\sum Q_j}$	$M_{eq} = \frac{L(Q_j \max)}{\sqrt{\sum A_j}}$