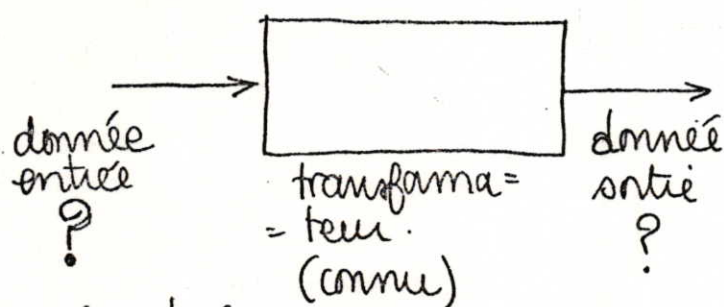


y Position du problème et situation

(1)

Durant la dernière décennie, grâce à la généralisation de l'informatique, les modèles de simulation du fonctionnement des réseaux d'assainissement ont été progressivement raffinés afin de rendre compte des multiples processus mis en jeu lorsqu'il y a précipitation - depuis le ruissellement de la goutte d'eau à peine tombée jusqu'à son passage à l'exutoire du bassin versant observé -

Ces modèles de transformation nécessitent évidemment la connaissance de la donnée entrée pluie.



- la donnée-entrée : pluie
- le transformateur : le bassin versant muni de son réseau d'assainissement
- la donnée-sortie : débit à l'exutoire.

si l'on suppose que le transformateur est décrit correctement à l'aide des modélisations de transfert de flux traduites informatiquement, il suffit d'avoir une connaissance suffisamment précise du flux entrant pour en déduire avec précision le flux sortant (modèle prévisionnel)

De quel type de données-entrée disposons-nous actuellement, dans le cas général ? Sous quelle formulation s'inscrit notre savoir des processus mis en jeu au cours d'une pluie ?

- Décrire 1 pluie signifie pour nous, obtenir les intensités moyennes précipitées sur de petits pas de temps, en n'importe quel point du bassin venant considéré.
- Or, cette préconstruction ne peut pas dans l'état actuel des sciences et des techniques se fonder sur une approche réductionniste physicienne des phénomènes. Nous voulons dire, il n'est pas possible de fonder une caractérisation des processus, à l'échelle qui intéresse l'hydrologie urbaine, à partir des lois physiques élémentaires, qui les gouvernent aux échelles microscopiques (processus de condensation, mouvement d'une goutte d'eau...) de nombre d'équations à résoudre, la complexité de résolution, l'impossibilité de définir précisément les conditions aux limites... tout concourt à la conclusion que même si le problème est théoriquement formalisable en ces termes - ce qui du point de vue mathématique revient à poser un énorme système d'équations différentielles - pratiquement il est irrésoluble sous cette forme.
- Cette impossibilité de découper le tout "complexe" en ses éléments simples constitue au sens de l'idéal classique de la science, une impossibilité de "connaissance objective" profonde. Elle imprime son caractère particulier à l'hydrologie, spécialement l'hydrologie urbaine, domaine des ingénieurs, des praticiens, des techniciens.
- En effet, la complexité ne s'est pas dissoute en complication, en artefact ingénieral du Grand Horloger dont il n'est alors pas possible d'occuper le lieu, extatique et objectif, celui du Logos pur; conséquemment l'hydrologie (urbaine) est rejetée dans les ténèbres de la $TEXV\eta$: discours pratique, ordonné à l'action efficace, la $TEXV\eta$ ne semble pas s'embarasser de scrupules, puisque négligeant les fondements, elle mélange sans complexe les méthodes (recettes?) mathématiques les plus

diverses, et semble par la même extrêmement sensible aux caractéristiques de l'outil de mesure du processus. (instabilité des modèles au changement d'échelle).

Pourtant, un tel arrêt nous semble superficiel ou du moins prématuré en ce qu'il scotomise une dynamique, une évolution sous prétexte de décrire la situation présente. En effet, plutôt que de dire, la ΤΕΧΝΗ néglige les fondements ne faudrait-il pas plutôt dire qu'elle n'a pas encore eu le temps de les préciser?

N'est-elle pas plutôt la praxis d'un savoir qui se cherche (une connaissance), murioir irréfléchi pour un autre λόγος (non exclusif du premier d'ailleurs). Un λόγος de la complexité irrésoluble de l'objet, un λόγος qui ne privilégie pas un niveau particulier d'observation de l'objet (niveau microscopique en science classique) mais qui définisse des niveaux de complexité propres (Prigogine) et qui reintègre

le sujet comme pôle essentiel pour comprendre la relation Science-Objet. (Mouni)

Ce n'est d'ailleurs pas un hasard, si les notions d'approche structurale systématique, de modèles holistiques, conceptuels... ont eu si grande fortune en hydrologie urbaine ces dernières années.

Ce n'est pas hasard si pour ce qui concerne plus particulièrement la pluie les concepts issus de la géométrie fractale, de la théorie des bruits bénéficient d'une audience accrue.

Ces tendances, il nous semble intéressant, de les rattacher à ce mouvement de mutation du λόγος, métabolisme qui, à notre avis, ne constitue aucunement un reniement, puisqu'au contraire l'efficacité, la maîtrise de l'étant n'est-elle pas, la fin dernière de la Science telle qu'elle se définit à l'aube des Temps Modernes (Heidegger).

④

Pour allons, dans la suite de cet exposé, et à la lumière de ce qui vient d'être dit, essayer de poser le problème de la modélisation des processus de précipitation pluvieuse.

Pour essayons, de caractériser brièvement et schématiquement, l'évolution du (des) problème(s) au cours du temps, puis dans la situation présente nous dégagerons les principales articulations sur lesquelles se fonde notre réflexion ainsi que des propositions de recherche et mise en œuvre.

II Historique (Histoire mythique d'un cheminement)

Historiquement, l'hydrologie débuta lorsqu'il fut décidé d'entamer des études concernant le régime de divers cours d'eau particulièrement "capricieux" (La Saône...) dont on voulait pouvoir prédire les crues avec plusieurs jours d'avance. Des relations devaient ainsi être établies entre les fortes précipitations mesurées en amont et les crues constatées en aval.

Parallèlement, le développement des concentrations urbaines et les exigences nouvelles issues du courant hygiéniste, décidèrent de l'implantation de réseaux souterrains d'assainissement toujours plus étendus pour la conception desquels il fallut définir des méthodes de calcul.

S'appuyant sur une connaissance des processus telle que les outils de mesure développés en hydrologie générale permettaient de l'obtenir et développant une approche de type rationnelle sur la modélisation du transformateur pluie-débit à l'exutoire du bassin, Caquot proposa le modèle qui porte son nom, méthode qui pendant quelques décennies fut la principale (voire la seule) des méthodes de calcul de réseau utilisées en France.

L'objectif avoué de la méthode très ambitieux et sa mise en œuvre relativement simple, la rendait en effet très séduisante.

Il ne s'agit rien moins que de déterminer, pour un réseau situé sur un bassin donné, les débits à l'exutoire associés à leur période de récurrence.

Pour ce faire, Caquot définit le temps caractéristique du bassin t_c (analogue au temps de concentration), temps à partir duquel la totalité des points du bassin influence le débit à son exutoire.

→ si l'on connaît l'intensité moyenne maximale pour la durée t_c et pour une période de récurrence fixée on supposera que la pluie rectangulaire ainsi définie permet de caractériser la valeur du débit maximal obtenue à l'exutoire pour cette même période de récurrence.

Schéma 1

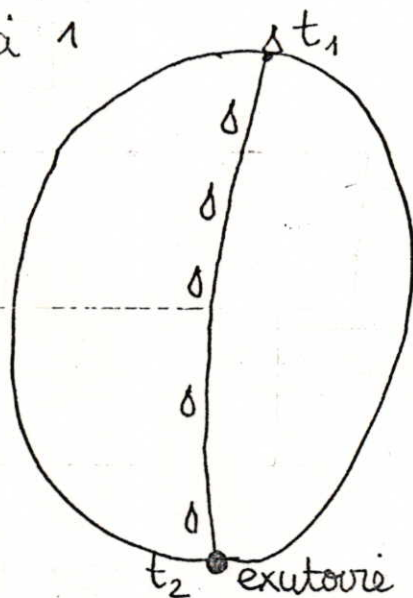
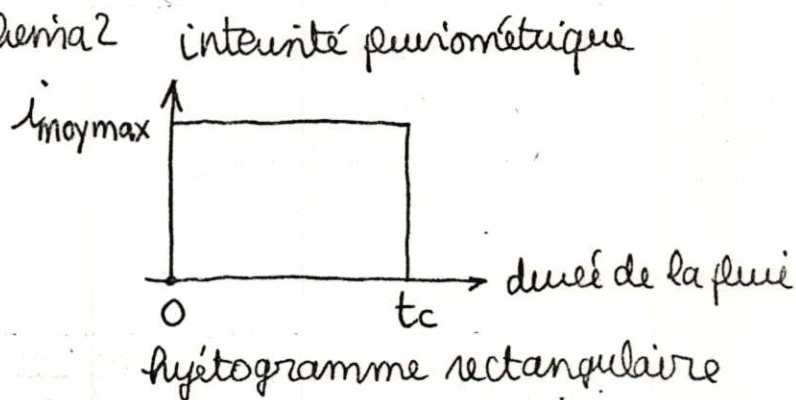


Schéma 2



t_1 : instant où la goutte d'eau s'abat sur le bassin versant.

t_2 : instant où la goutte d'eau franchit l'exutoire.

$t_c = \max(t_2 - t_1)$ le temps mis pour le plus long parcours de l'eau.

En effet,

si l'on suppose qu'en tout point du bassin versant, et à chaque instant, l'intensité pluviométrique est constante on obtient bien que le débit maximal à l'exutoire sera obtenu au bout d'un temps t_c (pour toute durée supérieure le débit n'augmente plus).

⑥ Il ne suffit plus dans ce cas, que de déterminer l'intensité moyenne maximale, sur le bassin considéré, pour une période de récurrence fixée, pour des durées allant de quelques dizaines de minute à plusieurs heures (temps de concentration courant en hydrologie urbaine)
Cette détermination s'effectue à l'aide d'abaques que l'on nomme les courbes Intensité - Durée - Fréquence

des courbes I.D.F. avaient l'énorme avantage de caractériser la pluviométrie à partir de l'outil de mesure relativement fruste dont on disposait à l'époque : Pluviographes dont les enregistrements papier ne permettaient pas un dépouillement (manuel) sur des durées inférieures à la 1/2 heure. Bien entendu, privilégiés étaient ceux qui pouvaient disposer d'un pluviographe situé à proximité du bassin considéré à partir duquel reconstituer les courbes IDF. généralement il fallait se contenter de valeurs moyennes déterminées sur une zone géographique étendue et supposée homogène du point de vue pluviométrique.

Pourtant, avec le temps, les exigences s'aiguisent, la bienheureuse simplicité des premiers ages s'estompent qui révèle d'autant plus les limites de la modélisation Caquot - Courbes I.D.F.

Le besoin de gérer des réseaux de plus en plus étendus, intriqués (Lyon 2000 km de canalisations), dont les coûts d'extension, de transformation grèvent les budgets municipaux de plus en plus lourdement, le développement des outils de mesure

, le développement des outils de calcul ont rendu inévitable et accéléré cette évolution.

On a assisté à l'apparition de systèmes de simulation globale (7) informatique articulant de multiples - modèles correspondant chacun à la différenciation des multiples "accidents" intervenant lors du déroulement du processus pluie - transformation - débit à l'exutoire (évaporation, ruissellement, écoulement libre, écoulement forcé...)

Ces systèmes sont théoriquement destinés à permettre la gestion de grands réseaux drainant des bassins étendus (ex Lyon 200 km^2) et en tant qu'ils se veulent reproduire le transformateur très finement ils requièrent par nécessité de cohérence, une description fine de la donnée-entrée à savoir la pluie.

Dès lors, on ne peut plus se contenter d'une pluie rectangulaire homogène spatialement d'autant plus que des expériences sur des réseaux de pluviomètres à forte densité et à pas d'intégration de mesure de l'ordre de quelques minutes ont démontré sa complète vraisemblance.

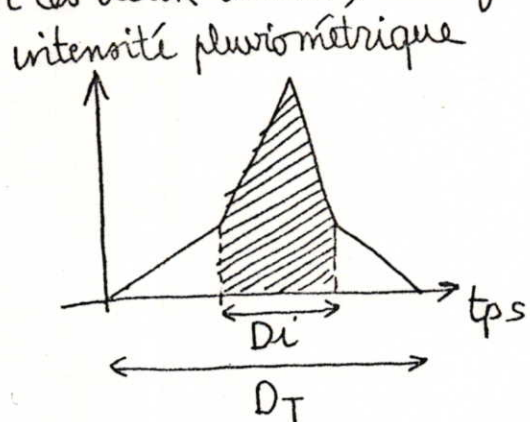
Les premières méthodes de caractérisation des pluies plus fines que celle fournie par les courbes I.D.F furent appel au même outil mathématique à savoir l'analyse statistique. Il faut savoir que les textes législatifs français concernant notamment la réglementation en matière d'assurance oblige le concepteur de réseau à garantir son bon fonctionnement pour une période de récurrence déterminée (ex le réseau ne doit pas déborder en moyenne plus d'1 fois tous les 10, 20, 50 ans...). ^{dans 1 premier tps et} Donc, selon

le même raisonnement que précédemment, on chercha à construire une pluie de projet (synthétique) dont les caractéristiques correspondent statistiquement à celles des pluies observées et à laquelle on fit attribuer une période de récurrence, période de récurrence qui serait pas la même occasion celle du débit à l'exutoire, associé.

La difficulté réside dans le fait qu'il faut pouvoir caractériser l'évolution temporelle du phénomène et sa différenciation spatiale. Le nombre de paramètres est si grand que toute pluie est absolument unique et a donc une probabilité nulle de se reproduire.

(8)

Plutôt que de définir le processus in se, dans l'absolu, certains ont alors proposé, pour sortir de l'impasse, de considérer la caractérisation de la pluie en relation avec les modèles utilisés en aval pour simuler le transformateur (bassin versant). Debordes, en particulier, a étudié quels étaient les paramètres de pluie significatifs au sens du modèle du réservoir linéaire. Il en a déduit qu'une pluie de projet, dans ce cas, peut être déterminée de manière pertinente, par la donnée de la durée totale de la pluie, la durée du période appelée de pluie intense, les hauteurs précipitées pour ces deux durées, une forme double triangle.

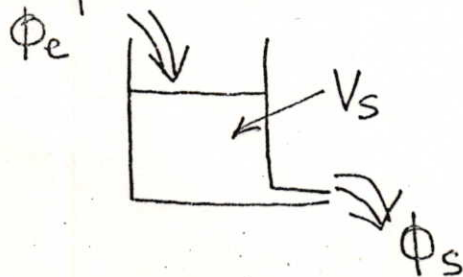


Hyéto gramme double-triangle proposé par Debordes.

- la surface hachurée représente la hauteur précipitée durant la période de pluie intense. (on la nomme pluie intense car à cette période les intensités pluviométriques sont les plus fortes)

Une telle méthodologie se révèle très séduisante en ce qu'elle est à la fois cohérente et simple de mise en œuvre.

cohérence d'abord. Le modèle du réservoir linéaire est un modèle qui prétend qualifier le transformateur de manière globale, holistique. Le processus de ruissellement de la goutte d'eau tombée sur le bassin, avant d'atteindre l'exutoire n'est pas retracé en ses moindres accidents mais un schéma dit conceptuel est appliqué à l'ensemble des processus concernant la totalité du bassin, sans recombinaison en niveaux supposés élémentaires. Il fait appel à l'image (ÉI605) du réservoir qui se remplit et en même temps se vide.



(9)

la métaphore du réservoir résout la complexité selon 3 paramètres fondamentaux reliés, dans un système d'équations différentielles (2 équations)

Φ_e : flux entrant (analogue de la pluie)

Φ_s : flux sortant (analogue du débit à l'exutoire)

V_s : variable d'état correspond au volume stocké dans le bassin.

* Une première équation, indique, le plus simplement, que le stockage est dû, à la différence entre les flux entrant et sortant

$$(1) \quad \Phi_s - \Phi_e = \frac{dV_s}{dt}$$

La deuxième équation indique la loi de stockage, choisie, a priori, par le chercheur. $V_s = V_s(\Phi_s, \Phi_e)$ c'est dans l'écriture de cette deuxième équation que le cheminement de pensée cesse d'appartenir à la mécanique rationnelle (équation (1)) pour devenir "conceptuel", c'est à dire fondé sur une comparaison entre "systèmes physiques" - bacs versants - bouteille - réservoir - ...

Si on choisit une loi de stockage linéaire on obtient un système linéaire en particulier:

$$(2) \quad V_s = K [\alpha \cdot \Phi_e(t) + [1 - \alpha] \cdot \Phi_s(t)] \quad \text{définit le modèle dit de Muskenigum.}$$

$$(2') \quad V_s = K \Phi_s(t) \quad \text{définit le modèle du réservoir linéaire}$$

- c'est un cas particulier du modèle de Muskenigum $\alpha = 0$ -

C'est, cette économie de moyens (- de paramètres -) que l'on retrouve dans la description de la pluie - ie le flux Φ_e - On recompose Φ_e selon la procédure décrite précédemment, les paramètres de composition étant ceux auxquels la variable V_s est le plus sensible.

Des lors, pour ces quelques paramètres; il est possible en utilisant l'outil statistique de définir leur fréquence pourtant, même

pour ce cas de figure relativement simple, il est difficile (pour ne pas dire impossible) de reconstituer un ϕ_e de probabilité donnée connaissant les probabilités des divers composants (durées, intensités...). En effet, ces paramètres ne sont pas indépendants mais le type de dépendance qu'ils entretiennent est obscur.

Une solution consiste à privilégier un des paramètres — par exemple la durée de pluie intense — dont la loi de probabilité sera dite, être celle de ϕ_e .

Une autre solution consiste, à abandonner la notion de pluie synthétique unique, représentative de la pluviosité en une région et de reconstituer une série de pluies à l'aide des lois sur les différents paramètres, série sur l'ensemble de laquelle on opérera la simulation, et à partir de laquelle on déduira la loi de probabilité des débits à l'exutoire du bassin.

Mais alors, pourquoi ne pas simuler directement sur les séries observées ?

Des américains ont envisagé de faire tourner, leur gros modèles de simulation du fonctionnement de réseau, en continu. Cela signifie, que sur une période de plusieurs années, il faut définir la pluviosité avec un pas de temps de l'ordre de quelques minutes (pas de temps optimum pour les programmes de transformation pluie-débit mis en œuvre). Il est alors possible, non seulement de quantifier les occurrences de débit en n'importe quel point du réseau mais encore de caractériser des phénomènes concomitants — notamment les transports d'effluents polluants aux quelles les américains sont particulièrement sensibilisés et qui nécessitent pour les caractériser la connaissance précise de ce qui se passe même en période sèche ou de faible pluviosité.

Moins ambitieux, les canadiens ont fait tourner des séries de "pluies historiques" triées (à partir de seuils concernant la durée de l'épisode pluvieux, et les intensités maximales moyennes sur divers pas de temps) notamment sur le bassin de Lacolle-Papineau à Montréal.

Ce décalage, entre série statistique de simulation et série historique de simulation, n'est léger qu'en apparence. Il introduit, en fait, un questionnement très différent.

D'un côté, il s'agit de caractériser grossièrement un vaste ensemble d'événements, de l'autre le problème se dédouble de caractériser finement chaque événement pris séparément.

S'agit-il d'un retour à la case départ ?

Certes, non. Bien plutôt, nous dirions que la double problématique reflète la situation actuelle en hydrologie urbaine.

La pluie synthétique (resp. la série statistique), fondée sur la définition de loi de probabilité de certains paramètres jugés caractéristiques sont adaptés à des modèles de transformation aval relativement grossier (prise en compte globale du bassin) et permettent d'obtenir des hydrogrammes pour des bassins petits (resp. moyens) en projet d'aménagement.

La série historique, fondée sur une description fine de pluies réellement observées, requiert des modèles de transformation relativement lourds permettant une caractérisation fine du transformateur.

Ces modèles sont indispensables pour gérer efficacement les grands réseaux hérités de l'ère d'expansion urbaine (Lyon bassin versant de 600km² comprenant environ 2000km de canalisations) notamment comme outil de diagnostic.

Une telle démarche, n'eût pas été possible du temps où Caquot conçut sa formule, elle eût donc été absurde. En effet, ni les moyens de calcul, ni les instruments de mesure requis n'étaient disponibles.

Aujourd'hui, c'est différent. Prenons, par exemple, le cas de LYON, qui nous intéresse plus particulièrement.

Nous disposons d'une description très précise des caractéristiques du réseau (configuration du réseau, nature des canalisations, dimensions...)

Nous disposons d'un ensemble de logiciels autorisant la simulation des processus occupant lors d'une averse (ruissellement, écoulements en surface libre, en conduite forcée...)

Nous disposons d'un réseau d'une trentaine de postes pluviométriques répartis sur le territoire de la CO.UR.LY ($\approx 600\text{km}^2$) effectuant

en synchronie, une mesure de l'intensité moyenne précipitée sur chaque pas de 6 minutes, en leur droit.

- Nous disposons de mesures de débit à l'exutoire d'un sous-bassin versant.

des deux premiers points constituent un ensemble de programmes et de fichiers informatiques nommé S.E.R.A.I.L (Simulation des Ecoulements dans le Réseau d'Assainissement Interurbain de Lyon)

Avec les outils de mesure mis en place (pluviomètres, débitmètres) il est désormais possible d'utiliser S.E.R.A.I.L pour une simulation fine(?) d'un événement réellement observé et de comparer les résultats donnés par le modèle à ceux mesurés (sur le bassin versant équipé de débitmètres.)

Pour ce qui concerne le traitement des mesures de la pluie, la problématique est donc de reconstituer le déroulement spatio-temporel complet du processus à partir de l'information fragmentaire que le réseau nous fournit. Plus précisément, la modélisation de la pluie tel que nous l'entendrons désormais, dans la suite de ce texte se donnera pour tâche, de quantifier les intensités moyennes précipitées sur de petits pas de temps en n'importe quel point du bassin versant.

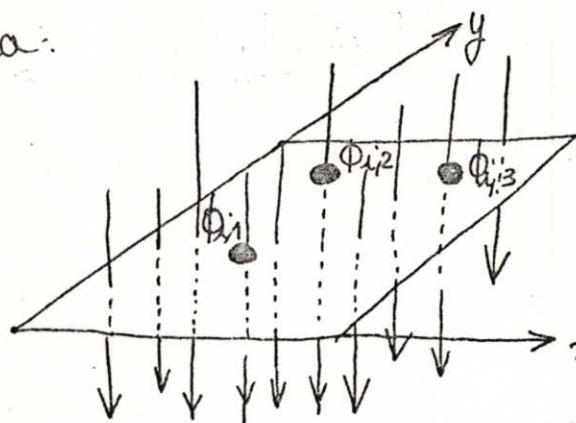
L'outil de mesure est-il suffisamment précis pour autoriser une quantification adéquate? Selon quel outil mathématique reconstituer la morphologie hypothétique de la pluie?

Telles sont les deux questions fondamentales qui se posent et dont nous allons tenter de mettre à jour quelques éléments de réponse.

III Modélisation de la pluie.

Schéma:

(13)



$\Phi_{i,j}$: le flux moyen mesuré au $i^{\text{ème}}$ pas de temps de mesure Δt au $j^{\text{ème}}$ poste:

→ Sur le territoire de la CO.UR.LY, le réseau de 27 postes pluviométriques (théoriquement en fonctionnement) permet de mesurer en 27 points, synchroniquement, le flux moyen précipité chaque six minutes.

Pour la séquence pluvieuse choisie, l'information de départ se résume donc en la donnée d'une matrice $\Phi(T, P)$ où:

T: nombre de lignes représente le nombre de pas de temps de mesure (6mn) que contient l'épisode considéré.

P: nombre de colonnes représente le nombre de postes pluviométriques en fonctionnement lors de cet épisode

donc: $\Phi(i, j)$ représente le flux moyen mesuré au $i^{\text{ème}}$ pas de temps sur le $j^{\text{ème}}$ poste.

Un premier point de vue, consiste à supposer que le flux pluvieux se caractérise par une fonction $\psi(x, y, t')$ où (x, y) coordonnées spatiales d'un point considéré (latitude, longitude), t' la variable temps (l'origine des tps étant pris le début de l'averse). C'est cette fonction ψ que l'on a pour objectif de redéfinir.

→ Or, ainsi posé, le problème est très difficile à résoudre, du fait de l'extrême irrégularité du phénomène observé tant spatialement que temporellement - irrégularité qui correspond à l'impossibilité de mettre d'œuvre un déterminisme simple des processus (cf introduction) -

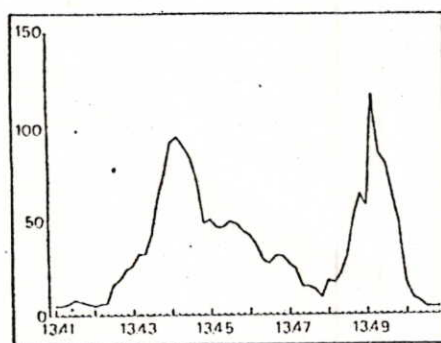
a) irrégularité temporelle.

Azoulay a mis au point, au début des années 80, un pluviomètre à capteur de pression, très performant puisqu'il permet de faire des mesures sur des pas d'intégration de l'ordre de 10s. A titre de comparaison le pluviomètre à augets basculeurs que nous utilisons ne permet pas de descendre à des pas d'intégration inférieurs à 5 mn, le pas choisi étant 6 mn par volonté d'homogénéité avec les mesures effectuées par la météorologie nationale -

Or, Azoulay a constaté que sur les très faibles pas d'intégration on peut constater des pointes d'intensité supérieures à 100 mm/h alors que si on considère le phénomène sur un pas d'intégration de l'ordre de la minute, la pointe est complètement masquée. On peut traduire mathématiquement cette constatation en écrivant:

$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \phi(x, y, [t + \Delta t])$ n'existe pas

- $\phi(x, y, (t + \Delta t))$ flux moyen mesuré entre t et $t + \Delta t$
- (le Δt minimal ayant été pris égal à qq secondes)



Evénement du 2 - 9 - 79
G.N.E.T. ISSY LES MOULINEAUX

Exemple de courbes $\psi(x, y, t[\Delta t])$ obtenues en mesurant avec un $\Delta t = 10s$. - la fonction est effectivement très irrégulière alors que l'événement observé sur des pas de l'ordre de plusieurs minutes n'a absolument rien d'exceptionnel - Ne le serait-elle pas encore plus si le phénomène avait été observé sur des pas inférieurs à la seconde, à la ressemblance des courbes fractales (lignes de côte...)?

On en déduit donc, que pour les Δt de mesure il n'est pas possible d'écrire $\psi(x_0, y_0, t) \approx \phi(x_0, y_0, [t + \Delta t])$ à partir d'un certain ΔT .

Il est donc implicite, que si $\psi(x, y, t)$ est donné, il ne peut l'être qu'en fonction d'un ΔT ($\psi(x, y, t[\Delta T])$, modulo ΔT). 'En réalité', la variable temps (t), est dissociée des variables espace (x, y) et pour l'intervalle ΔT considéré ($\geq$ l'intervalle de mesure), on détermine $\phi(x, y, [t, t + \Delta t])$ le flux moyen, entre t et $t + \Delta t$, en tout point de l'espace considéré, à partir des mesures $\phi(x_i, y_i, [t + \Delta t])$, aux points (x_i, y_i) , intégrées sur Δt .

b) irrégularité spatiale :

- l'irrégularité spatiale est aussi fonction du pas de temps choisi d'observation du phénomène - d'intégration du flux -
- Plus le pas de temps est faible plus la dispersion spatiale des mesures effectuées sur la CO.U.R.L.Y est, en moyenne, élevée.
- La variation spatiale de la hauteur totale précipitée en un mois est moindre que la variation spatiale enregistrée sur les hauteurs journalières et aiori de suite.

On en déduit qu'une modélisation capable de reconstituer correctement la lame d'eau intégrée sur un pas de temps ΔT_1 à partir de l'information donnée par le réseau, ne sera pas forcément adéquate sur un pas ΔT_2 inférieur à ΔT_1 .

La question qui se pose alors est de définir quels sont les types de modélisations susceptibles de reproduire le plus pertinemment la lame d'eau, connaissant le densité du réseau de postes (30 sur 600 km²) et les intervalles d'intégration qui intéressent l'hydrologue urbain ($995 \text{ mn} \leq \Delta T \leq 995 \text{ h}$).

Tel objectif nécessite, premièrement d'interroger, plus précisément cette irrégularité apparemment irréductible du processus visuel, d'en reconnaître le statut.

Pourquoi se trouve si évidemment niée l'hypothèse classique d'après laquelle à échelle fine tout objet peut être décrit selon une morphologie élémentaire - par exemple description suivant des fonctions analytiques des variables $(\vec{x}, t)$ - ?

Il nous faut l'admettre, cette échelle d'observation pour laquelle le tout complexe s'est redécomposé en simplicité telle que l'on peut penser l'objet comme un "absolu objectif" en occultant l'acte du percevoir et du composer, cette échelle définissant le niveau fondamental d'observation pour la démarche réductionniste n'existe pas, en l'occurrence.

L'objet se révèle phénomène d'autant plus complexe que l'outil de mesure mis en œuvre pour le percevoir est plus précis (pas de temps plus faibles, nombre de postes plus importants), chaque échelle d'observation semblant définir un niveau de complexité correspondant -

Ai-dessous, nous présentons quelques exemples, concrets illustrant le "phénomène d'échelle" dont nous parlons. Ils sont tirés d'une étude effectuée sur 1 événement du 15 juillet 1985 ayant duré 90 mn et pour lequel le réseau de mesure comportait 14 postes (valides sur 25 théoriques à cette date):

des 3 paramètres présentés caractérisent de manière globale la mesure effectuée sur le réseau, ils sont calculés pour différents pas d'intégration de la mesure ΔT - $\Delta T = 6 \text{ mn}, 12 \text{ mn}, 18 \text{ mn}, 24 \text{ mn}, 48 \text{ mn}$ -

- 1) le histogramme moyen sur l'ensemble du réseau
- 2) le graphe des écarts à la moyenne (permet de mesurer la dispersion spatiale des mesures à chaque pas de temps)
- 3) la trajectoire calculée

le calcul de la trajectoire contrairement aux deux autres paramètres suppose une modélisation préalable puisque à chaque pas de temps ΔT , la position définie est le barycentre de la lame d'eau intégrée au ΔT , seuillée suivant une valeur définie au préalable par le manipulateur. Sans poser, dès à présent, le problème de la modélisation choisie, nous voulons insister ici sur les différences mises en évidence quant au trajet plus ou moins irrégulier obtenus suivant ΔT (tendance constatée quelque soit la modélisation mise en œuvre et avec la même acuité).

- Modéliser c'est dégager une morphologie qui fût dans l'espace de calcul un analogon plus ou moins exact de l'objet réel
- l'exactitude s'évaluant par le degré de prédiction quantitative que le modèle permet -

Le problème spécifique posé par la modélisation de la pluie consiste en ce que cette morphologie ne se dégage pas de soi-même lorsque l'outil de mesure se fait plus précis. Bien au contraire, notamment lorsque le pas de temps diminue on assiste à la dissolution des formes simples, qui se profile comme un avant-goût du chaos. ou autrement dit à échelle très fine la pluie pourrait être considérée comme un bruit pur...

→ Il existe un autre outil de mesure capable de guider le chercheur pour l'élaboration de modèle de pluie : le radar.

Le principe de mesure est le suivant :

L'espace est balayé par un faisceau d'ondes centimétriques. Une image est obtenue recomposant la carte des réflectivités mesurées sur des pixels élémentaires de surface $0.8 \times 0.8 \text{ km}^2$. La réflectivité sur un pixel est donnée quasi-instantanément tandis que l'image entière correspondant à une rotation du faisceau est donnée en environ une minute.

lors d'événements orageux, on observe l'apparition de structures dynamiques, adjacentes ou emboîtées, grandes ou petites, éphémères ou durables structures désignées sous le nom de

cellules convectives. L'observateur peut, généralement, en visionnant les images successives produites à partir de la mesure radar, dégager les tendances significatives notamment pour ce qui concerne la trajectoire et la vitesse des structures les plus importantes. Des recherches sont menées actuellement sur les moyens de traitements possibles de cette information - qui permettraient de calculer automatiquement (par ordinateur) les paramètres qui caractérisent ces tendances significatives et qui en hydrologie urbaine sont d'un intérêt majeur si l'on veut un jour pouvoir effectuer la gestion automatisée de réseaux en temps réel.

Malheureusement, l'un des points faibles de cet outil, reste le passage difficile entre la mesure de réflectivité et celle de hauteur d'eau précipitée - hauteur d'eau précipitée qui est la grandeur fondamentale qu'il faut caractériser en tout point du bassin versant pour pouvoir simuler son fonctionnement - Pourtant, malgré cette imperfection, le seul fait que le radar mette en évidence, lors d'événements pluvieux, des configurations spatiales relativement stables dans le temps (déformations et trajectoires observables), jette une lumière nouvelle sur le processus visé, et le statut de "son irrégularité spécifique", lorsqu'il est perçu à travers un réseau de postes pluviométriques.

Pour dire, que l'irrégularité constatée est à mettre en relation étroite avec les qualités de l'outil de mesure - réseau pluviométrique. En particulier, dû au fait que la mesure est spatialement quasi-punctuelle, elle intègre inévitablement dans le même perçu des structures qualitativement différentes et ceci est d'autant plus vrai que le pas d'intégration est faible.

des cellules éphémères et durables, les cellules de grandes et petites dimensions lorsqu'elles influencent un poste il est impossible d'en décomposer l'influence et l'importance de l'insignifiant (petites cellules éphémères) à tendance à croître jusqu'à dominer pour les pas ΔT de l'ordre de la seconde.

On comprend ainsi, pourquoi la mesure sur un poste peut être instable, non représentative de ce qui se passe alentour, bruitée.

Dès lors, une des tâches essentielles du modélisateur est de définir, dans cette intricication indémêlable du réel, ce qui pour lui est le significatif, quels sont les seuils de différenciation qualitative, de discerner, à l'aide des outils conceptuels, mathématiques dont il dispose, ce que l'outil de mesure fut incapable de trier.

- Renonciation non seulement à l'objet en soi, mais aussi au phénomène en soi que les tenants du pur idéal classique (mécanique rationnelle...) qualifierait de renoncement techniciste mais qui nous paraît plutôt participer d'une démarche positive face à un réel beaucoup plus complexe qu'on ne saurait l'imaginer (qu'on ne saura jamais l'imaginer ?) - L'exemple de la pluie, comme d'ailleurs de la plupart des phénomènes en hydrologie urbaine, souligne cette complexité imparable à un logos pur, qui occulterait l'observateur et ce qu'il veut percevoir de l'objet, et constitue un jalon dans les transformations que nous ayons discerné et dont nous avons parlé en introduction.

Pour ce qui nous concerne, il nous faut pouvoir décrire la pluie de manière cohérente avec les modèles de simulations des processus occupant en réseau lesquels s'ordonnent à pécher le débit à l'exutoire des différents sous-bassins versants considérés, et plus encore en n'importe quel point du réseau, à n'importe

moment, pour un épisode pluvieux considéré - s'il s'agit d'un outil de diagnostic comme le système serait par exemple -

La cohérence réside dans le fait que les erreurs entraînées du fait de la simplification du phénomène pluvieux par la modélisation sont du même ordre de grandeurs que les erreurs enregistrées pour les autres processus mis en jeu. Autrement dit il faut trouver le seuil au-delà duquel toute augmentation de précision n'entraînera qu'une amélioration négligeable de l'adéquation des résultats calculés à ceux mesurés ou une simulation de l'ensemble des processus.

Mais bien entendu un tel critère d'évaluation des modèles n'est possible qu'a posteriori et il ne préjuge en rien de la manière d'aborder et d'exploiter les données recueillies par les postes - déterminer a priori ce qui est significatif -

Nous allons maintenant aborder le problème spécifique de reconstruction de la pluie sur l'ensemble du territoire à partir des données-réseau. Deux grandes perspectives sont possibles

- l'une définit une "reconstruction déterministe" de la pluie. On utilise pour ce faire des méthodes d'approximation et d'interpolation.

- l'autre définit une approche probabiliste apparentée aux méthodes utilisées notamment en géométrie fractale.

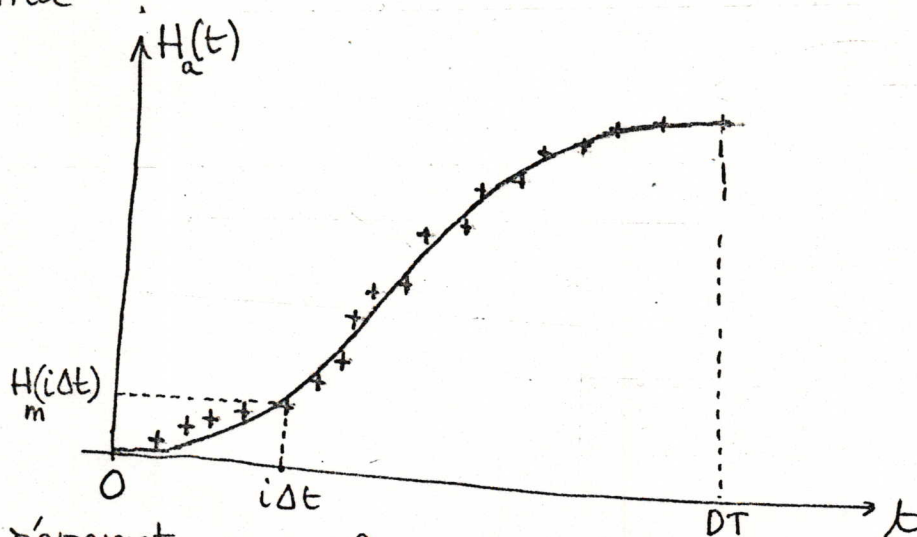
Proposition de "reconstruction déterministe".

Dans ce type d'approche, le souci constant est d'éliminer "les bruits" auxquels la mesure est sujette.

Une première précaution consiste à choisir la grandeur pluviométrique qui, a priori, risque d'être le moins sensible au parasitage des cellules brèves et de petites dimensions. C'est la raison pour laquelle, nous préconisons de travailler sur la grandeur $H_p(t)$ — hauteur précipitée cumulée totale au poste p sur la durée $[0, t]$ l'origine étant le début de l'événement pluvieux considéré —

On obtient, au poste p , un nuage de points de mesure représenté ci-dessous:

Schema



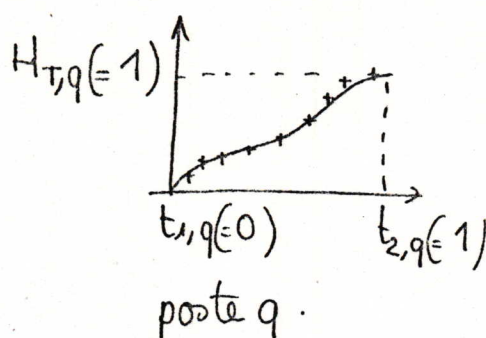
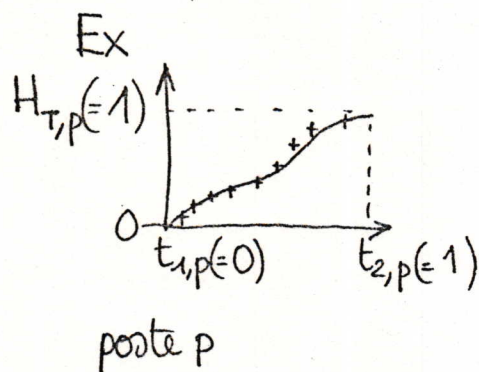
- + : représente une valeur mesurée sur le poste considéré.
- : le tracé est la fonction approximante obtenue pour ce nuage de points
- DT : durée totale de l'événement.

On cherche ensuite, en chaque point p , à définir, la fonction analytique qui approxime au mieux le nuage de mesure. On peut, par exemple, choisir comme critère les moindres carrés. Cette technique est supposée permettre de retrouver en chaque poste, le patron temporel du phénomène épuré, en partie du moins, des parasites.

On peut, à ce stade, effectuer un certain nombre de traitements fondés sur la comparaison des graphes obtenus aux différents postes.

- détermination des notions d'antériorité ou de postériorité d'occurrence de l'événement sur un poste par rapport à un autre.
- Chaque poste étant repéré, par l'instant de début de pluie

en son droit -origine mobile-, peut-on approximer les nuages aux différents postes par la même fonction?



$H_{T,p}$: hauteur totale précipitée au poste p, sur la durée totale de l'événement.

$t_{1,p}$: début de l'averse au droit du poste p.

$t_{2,p}$: fin de l'averse au droit du poste p.

- Pour permettre une comparaison pertinente des formes obtenues sur les différents postes on ramène pour tous les postes l'intervalle $[0; H_{T,p}]$ à l'intervalle $[0; 1]$ et l'intervalle $[t_{1,p}; t_{2,p}]$ à l'intervalle $[0; 1]$

de passage au nuage s'effectue soit par des méthodes d'interpolation soit par des méthodes d'approximation. En effet, puisqu'on suppose que les bords sont éliminés, chaque poste peut désormais être considéré, comme représentatif, de ce qui se passe en sa proximité. Il suffit alors que le réseau soit suffisamment dense pour que la réunion des zones de représentativité des postes couvrent la totalité du territoire considéré.

Nous avons, mis en œuvre, informatiquement, trois types de modélisation, permettant le passage des valeurs-réseau, à la définition de la lame.

méthode 1: la pondération simple sur les distances.

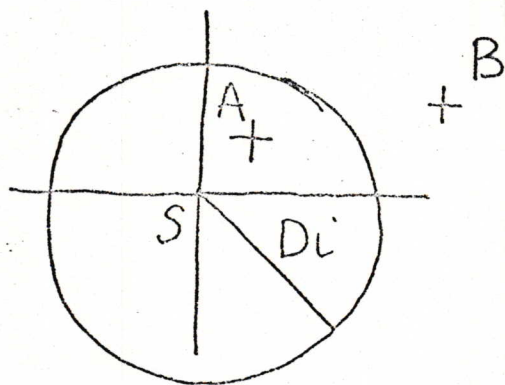
Il s'agit d'approximer les valeurs d'intensité aux sommets d'un quadrillage préalablement défini, à partir des valeurs obtenues sur le réseau. La valeur approximée en un sommet est une interpolation linéaire des valeurs mesurées sur le réseau.

Le coefficient d'interpolation pour chaque poste est fonction de l'inverse de la distance poste-sommet à une certaine puissance dénotée α (on suppose que plus le poste est éloigné du sommet, moins il doit être pris en compte pour approximer la valeur du sommet)

On a choisi dans les exemples qui suivront $\alpha = 1, 2, 3, 5$.

- Toujours pour le calcul de l'approximation aux sommets d'un quadrillage par la méthode de la pondération simple par les distances on a défini un concept appelé distance d'influence, qui signifie la distance à partir de laquelle on considérera qu'un poste déterminé n'a pas d'influence sur le sommet étudié autrement dit, ne doit pas être pris en compte pour le calcul de l'interpolation linéaire.

Schéma:



D_i : distance d'influence (déterminée par le manipulateur)
Soit à déterminer la valeur approximée d'intensité au sommet S, le poste A entrera en compte pour le calcul de l'interpolation mais non le poste B

méthode 2: la pondération voisée sur les distances.

le modèle est fondé sur le même principe d'interpolation que dans l'option 1, mais la différence réside dans le fait que pour l'approximation d'intensité au sommet S n'interviendront plus seulement des hauteurs mesurées au droit des points voisins mais encore les hauteurs approximées aux sommets situés dans la zone d'influence de S.

La conséquence en est que les résultats obtenus par la deuxième catégorie de modèles sont beaucoup plus lisses que dans le cas précédent.

D'autre part, concernant le calcul lui-même, il s'agit d'une méthode implicite de résolution alors que dans le premier cas la résolution est explicite. Il en découle que le temps calcul en est allongé de manière considérable la résolution est en fait à chaque pas de simulation définie comme la limite d'une série pour chaque sommet.

méthode 3: calcul d'une équation $H = H(x, y)$

Il s'agit, dans ce type de modèle, de calculer l'équation de la surface d'approximation de la lame, à partir de la méthode des moindres carrés. Ce modèle nécessite pour sa mise en œuvre la connaissance d'une base de fonctions $\Phi_i = \Phi_i(x, y)$ x, y étant les coordonnées d'un point de la surface de la COURLY qui représentent respectivement sa longitude et sa latitude.

Ces modèles sont actuellement testés sur les résultats qu'ils fournissent concernant la lame précipitée cumulée sur la durée totale de l'averse.

Les vérifications de validité des modèles portent sur plusieurs points:

- stabilité du modèle en fonction de la dégradation de l'information pluviométrique (suppression de postes pluviométriques)
- stabilité du modèle en fonction de ses paramètres de calcul (α , D_i , nombre de fonctions de base...)
- Evaluation directe de l'écart valeur approximée - valeur mesurée sur des postes qui n'ont pas servi pour la mise en œuvre du modèle.

Rm:

Ces comparaisons et évaluations portent sur des grandeurs numériques premières (hauteurs ponctuelles) ou dérivées (hauteurs moyennes, dispersion spatiale des valeurs...) mais aussi chaque fois qu'il est possible sur des représentations graphiques des résultats. (lames d'eau cumulée en perspective, courbes isohyètes...)

Proportion de "reconstruction probabiliste"

Dans ce type d'approche, le bruit est au contraire considéré comme concept premier et l'on cherche à le caractériser en déterminant les lois qui le régissent à partir des mesures effectuées. Ces lois sont des lois de probabilité.

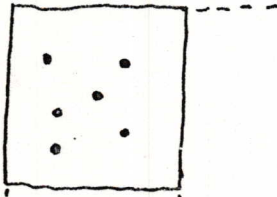
La grandeur que l'on choisira d'évaluer dans ce cas n'est plus une hauteur cumulée mais l'intensité moyenne obtenue sur le plus petit pas de mesure, au droit des différents postes - $\Phi_p(t, t+\Delta t)$ intensité moyenne obtenue au poste p dans l'intervalle $[t, t+\Delta t]$, Δt pas de mesure minimal -

Comme précédemment, le problème de la densité des postes se pose

Il faut suffisamment de points de mesure pour caractériser correctement le bruit, soit globalement sur le

territoire si l'on considère le phénomène homogène sur tout l'espace considéré soit localement en subdivisant le territoire en sous-ensemble sur lequel le bruit est considéré comme homogène - dans ce dernier cas le nombre de postes requis a priori est encore plus élevé -

Schema:



• points de mesure.

- élément de surface sur lequel le phénomène est considéré comme homogène

Le principe consiste à caler une loi de probabilité à partir des semis recueillis.

On peut supposer que la loi est la même pour tous les sous-ensembles ainsi que pour le territoire considéré globalement, seul ses paramètres changent (hétérogénéité spatiale).

Nous pensons en particulier tenter d'utiliser la loi exponentielle (souvent utilisée pour les phénomènes irréguliers à toute échelle)

A partir de là, la question importante consiste à définir comment le calage loi-semis sera effectué, quelle quantité d'informations il requiert, et la précision correspondante obtenue sur le résultat.

Nous nous réservons d'en parler plus tard lorsque plusieurs expériences sur des événements plusieurs observés nous auront permis de mûrir notre réflexion.

Conclusion

A partir d'une réflexion sur les processus mis en jeu lors d'une averse pluvieuse en relation avec les moyens et motivations du modélisateur potentiel, nous avons dégagé deux voies possibles de recherche. L'une de ces voies est largement débroussaillée, l'autre est encore à l'état de piste. Beaucoup de travail reste donc à faire pour rendre opérationnel les outils de modélisation et pour valider les méthodes qui en résultent.

Toutefois, il nous semble que désormais le problème est posé de manière suffisamment claire pour nous laisser espérer des résultats relativement fiables, à moyen terme.