

## 5.2 Représentations du processus d'accumulation

### 5.2.1 Problématique de l'accumulation

Les activités industrielles, le transport, l'érosion due aux actions climatiques sont des sources d'apport en particules solides. Ces apports de particules s'accumulent à la surface d'un bassin urbain durant la période de temps sec. Le processus d'accumulation des particules est un phénomène physique complexe soumis à différentes interprétations. Trois approches distinctes existent pour décrire le processus d'accumulation. La première consiste à considérer l'accumulation variable dans le temps. La masse de solides accumulés est fonction du temps écoulé depuis le dernier événement pluvieux. Cette accumulation est généralement décrite à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{dMa(t)}{dt} = ACCU - DISP Ma(t) \quad (5.1)$$

où  $Ma$  représente la masse de particules solides accumulées (kg);  $ACCU$ , le taux d'accumulation journalier (kg/j);  $DISP$ , le coefficient de disparition des particules ( $j^{-1}$ ). L'accumulation de particules se fait durant la période de temps sec de manière exponentielle jusqu'à atteindre une valeur limite asymptotique. Sartor *et al.* (1974) ont montré que l'accumulation maximale est atteinte après environ dix jours mais cette valeur varie grandement en fonction des bassins. Des relations linéaires entre la masse accumulée et le temps ont également été élaborées. Ces relations ont donné dans certains cas (Barbe *et al.*, 1996) de bons résultats. La seconde approche consiste à considérer l'accumulation comme un phénomène instantané. La masse de particules accumulées est reconstituée instantanément à la fin d'un événement pluvieux. Cette approche permet de simplifier la formulation des modèles de lessivage. Enfin, la dernière approche consiste à considérer que l'accumulation est infinie. Dans ce cas, la masse de particules

accumulées est supposée infinie. Cette approche permet également de simplifier la formulation des modèles de lessivage.

### 5.2.2 Choix d'un modèle d'accumulation

Le choix d'un modèle d'accumulation est toujours délicat puisqu'il consiste à déterminer l'approche existante la mieux adaptée pour décrire le processus d'accumulation. Afin de faciliter ce choix, il est possible de considérer le bassin urbain comme une juxtaposition de surfaces imperméables et perméables. Les surfaces perméables, constituées de sols granuleux naturels ou aménagés, peuvent être vues comme des réserves inépuisables de particules solides. Cette hypothèse se justifie parfaitement puisque les particules solides sont la matière constituante de ces surfaces. Les surfaces perméables correspondent donc à des zones d'accumulation infinie.

L'accumulation sur les surfaces imperméables s'avère beaucoup plus difficile à appréhender. Grommaire (1998) a montré l'existence du lessivage sur les chaussées urbaines et Sartor *et al.* (1974) a mis en évidence l'existence d'une accumulation durant la période de temps sec. Or, les études statistiques de Kanso *et al.* (2005) montrent que la période de temps sec n'a pas d'effet sur le processus d'accumulation. De plus, les analyses de Butler *et al.* (1992) sur des mesures réalisées dans six sites différents, ne font ressortir aucune dépendance entre la masse de particules solides accumulées et la masse de particules solides lessivées. Par conséquent, les surfaces imperméables semblent se comporter comme des zones d'accumulation infinie où la perte de particules solides est instantanément compensée par un apport équivalent. Cet apport provient des actions climatiques et des activités humaines

Les contradictions entre les auteurs sur la nature du processus d'accumulation sur les surfaces imperméables s'expliquent par la complexité des phénomènes physiques en jeu.

De plus amples études semblent donc nécessaires en vue de lever les ambiguïtés existantes.

### 5.3 Formulation du modèle RQSM

#### 5.3.1 Modèle de mise en suspension des particules solides

Le modèle de mise en suspension repose sur les hypothèses suivantes :

- 1- l'accumulation est infinie sur les surfaces imperméables et perméables;
- 2- l'intensité de la pluie est uniforme sur le bassin;
- 3- l'arrachement des particules solides dépend de l'énergie cinétique des précipitations (Young et Wiersma, 1973).

Salles *et al.* (2002) ont démontré analytiquement que la relation la plus appropriée pour calculer l'énergie cinétique des précipitations en fonction de leur intensité est la suivante :

$$KE(t) = \alpha I(t)^\beta \quad (5.2)$$

où  $KE$  représente l'énergie cinétique de la pluie par unité de surface et de temps ( $J \cdot m^2 \cdot h^{-1}$ );  $\alpha$  et  $\beta$ , des paramètres liés aux processus microscopiques de formation des gouttes de pluie;  $I$ , l'intensité de la pluie (mm/h). De plus, Salles *et al.* (2002) ont montré que l'équation (5.2) était physiquement réaliste pour une valeur de  $\alpha$  comprise entre 9,2 et 13,5 et pour une valeur de  $\beta$  comprise entre 1 et 1,4. Par conséquent, l'hypothèse d'accumulation infinie conduit à exprimer le taux de mise en suspension par unité de surface imperméable à l'aide de l'équation suivante :

$$mp_{imp}(t) = \frac{\alpha Kp_{imp}}{3600} I(t)^\beta \quad (5.3)$$

où  $mp_{imp}$  représente le taux de mise en suspension des particules solides par unité de surface imperméable ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $Kp_{imp}$ , le coefficient de mise en suspension des particules solides pour les surfaces imperméables ( $\text{kg/J}$ ).

La mise en suspension des particules solides sur les surfaces perméables est également fonction de l'énergie cinétique de la pluie. Elle débute lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration des surfaces perméables. L'intensité de mise en suspension surfacique pour les surfaces perméables est donnée par :

$$mp_{per}(t) = \frac{\alpha Kp_{per}}{3600} [I(t) - f(t)]^\beta \quad (5.4)$$

où  $mp_{per}$  représente le taux de mise en suspension des particules solides par unité de surface perméable ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $Kp_{per}$ , le coefficient de mise en suspension des particules solides pour les surfaces perméables ( $\text{kg/J}$ );  $f$ , la capacité d'infiltration des surfaces perméables ( $\text{mm/h}$ ).

Les équations (5.3) et (5.4) montrent que la mise en suspension des particules solides est contrôlée par le paramètre  $Kp_{imp}$  pour les surfaces imperméables et par le paramètre  $Kp_{per}$  pour les surfaces perméables. De plus, le taux de mise en suspension  $mp_{per}$  fourni par l'équation (5.4) est nul lorsque  $f(t) \geq I(t)$ .

### 5.3.2 Modèle de transport des particules solides

Les MES sont physiquement transportées à l'exutoire par le débit de ruissellement. Ce processus de transport des MES peut être modélisé à l'aide de la théorie des systèmes linéaires (Chow *et al.*, 1988) et des hypothèses physiques suivantes :

- 1- la réponse impulsionnelle du bassin est rectangulaire. De plus elle a une durée égale au temps de concentration du bassin;
- 2- le temps de concentration pour les particules solides et liquides est identique;
- 3- le transport des MES sur les surfaces perméables est indépendant du transport des MES sur les surfaces imperméables.

La théorie des systèmes linéaires a été originellement utilisée pour modéliser le ruissellement à la surface des bassins. D'après Chow *et al.* (1988), le débit de ruissellement à l'exutoire d'un bassin est donné par le produit de convolution entre l'intensité nette des précipitations et la réponse impulsionnelle du bassin :

$$Q(t) = \int_0^t I_{nette}(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (5.5)$$

où  $Q$  représente le débit de ruissellement à l'exutoire du bassin ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $I_{nette}$ , l'intensité nette des précipitations ( $m \cdot s^{-1}$ );  $u$ , la réponse impulsionnelle du bassin ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $t$ , le temps (s).

L'utilisation de la concentration de MES dans la lame d'eau de ruissellement permet de transformer le modèle de ruissellement formulé selon l'équation (5.5), en un modèle de transport des MES. Ce modèle de transport des MES est donné par l'équation suivante :

$$ml(t) = \int_0^t I_{nette}(\tau) C(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (5.6)$$

où  $ml$  représente la charge de matière en suspension (kg/s);  $C$ , la concentration de MES dans la lame d'eau de ruissellement ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Or, la multiplication de l'intensité nette des précipitations par la concentration de MES dans la lame d'eau de ruissellement est égale au taux de mise en suspension des particules solides par unité de surface. Par conséquent, l'équation (5.6) peut s'écrire de la manière suivante :

$$ml(t) = \int_0^t mp(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (5.7)$$

où  $mp$  représente le taux de mise en suspension des particules solides par unité de surface ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

La Figure 17 montre que la durée de la réponse impulsionnelle d'un bassin est égale au temps de concentration  $t_c$  du bassin.

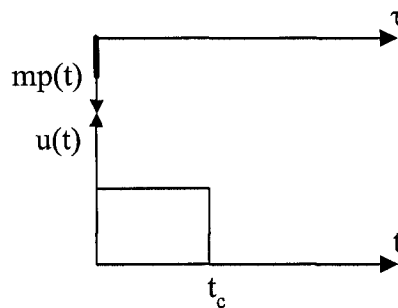


Figure 17 Réponse impulsionnelle d'un bassin

Or, le temps de concentration varie en fonction de la pente, de la rugosité et de la longueur de drainage du bassin (Chow *et al.*, 1988). Par conséquent, le modèle de transport décrit par l'équation (5.7) prend en compte l'influence des caractéristiques physiques du bassin sur le transport des MES.

La Figure 18 présente trois pollutogrammes différents calculés par l'équation (5.7) en considérant  $mp$  constant.

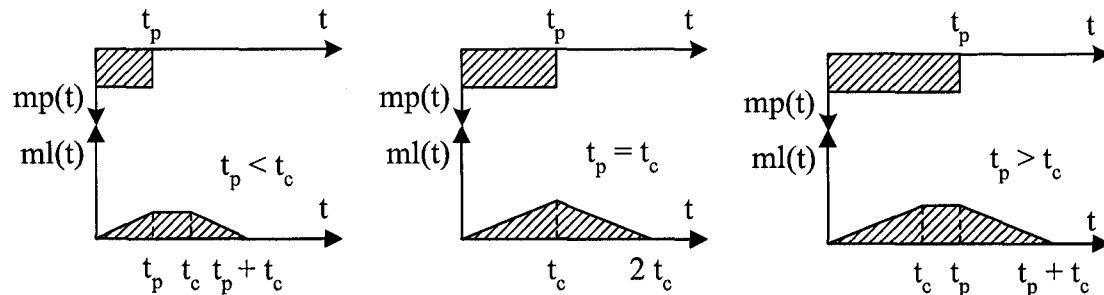


Figure 18 Réponses d'un bassin à une intensité de mise en suspension de durée  $t_p$

Les pollutogrammes changent en fonction de la relation de supériorité entre la durée du processus de mise en suspension  $t_p$  et le temps de concentration  $t_c$  du bassin. Le premier pollutogramme correspond au cas  $t_p < t_c$ . Dans ce cas, la charge de MES simulée augmente jusqu'à  $t_p$ . À cet instant, une proportion  $t_p/t_c$  du bassin contribue à l'exutoire. Ensuite, la charge reste constante jusqu'à  $t_c$  grâce à la contribution fournie par la partie supérieure du bassin. Le second pollutogramme correspond au cas  $t_p = t_c$ . Dans ce cas, la charge de MES augmente jusqu'à  $t_c$ . À cet instant, la charge est maximale puisque l'ensemble du bassin contribue à l'exutoire. Le dernier pollutogramme correspond au cas  $t_p > t_c$ . Dans ce cas, la charge de MES augmente jusqu'à  $t_c$ . Ensuite, la charge reste constante jusqu'à  $t_p$  puisque la mise en suspension se poursuit après  $t_c$ , sur l'ensemble du bassin. L'étude des pollutogrammes résultant de l'application de l'équation (5.7) amène deux commentaires. Premièrement, la masse de MES générée par l'équation (5.7) est toujours égale à la masse de MES mise en suspension. De plus, la durée du pollutogramme simulé est toujours égale à la somme de  $t_p$  et  $t_c$ .

Les hauteurs de précipitation sont généralement mesurées à pas de temps variables. Elles sont ensuite échantillonnées à pas de temps constants et transformées en intensités. Par conséquent,  $mp$  est discrétisé avec le même pas de temps que l'intensité des précipitations. En choisissant un pas de temps d'échantillonnage unitaire de durée 1 minute, le produit de convolution entre le taux de mise en suspension par unité de surface et la réponse du bassin est donné par l'équation suivante :

$$ml(m) = \sum_{i=1}^{m \leq m_r} [mp_{imp}(i) u_{imp}(m-i+1)] + \sum_{i=1}^{m \leq m_r} [mp_{per}(i) u_{per}(m-i+1)] \quad (5.8)$$

avec :

$$u_{imp}(m-i+1) = \frac{10\,000 \text{ IMP } A}{t_c} \quad \text{pour} \quad 1 \leq (m-i+1) \leq t_c \quad (5.9)$$

et

$$u_{per}(m-i+1) = \frac{10\,000 (1-IMP) A}{t_c} \quad \text{pour} \quad 1 \leq (m-i+1) \leq t_c \quad (5.10)$$

où  $u_{imp}$  représente la réponse impulsionnelle des surfaces imperméables ( $m^2/\text{min}$ );  $u_{per}$ , la réponse impulsionnelle des surfaces perméables ( $m^2/\text{min}$ );  $A$ , la superficie du bassin versant (ha);  $IMP$ , la fraction de surface imperméable directement drainée;  $t_c$ , le temps de concentration du bassin versant (min);  $m$  et  $i$ , des indices de temps;  $m_r$ , l'indice final du vecteur des taux de mise en suspension par unité de surface. Les conditions  $mp_{imp}(i) \geq 0$ ,  $mp_{per}(i) \geq 0$  doivent être respectées dans l'équation (5.8). De plus, la notation  $m \leq m_r$  sur la borne supérieure de la sommation indique que la sommation s'effectue de  $i = 1$  à  $m$  pour  $m \leq m_r$  et de  $i = 1$  à  $m_r$  pour  $m > m_r$ .



Trois remarques sont à faire à propos du modèle RQSM. Premièrement, le modèle RQSM dissocie la contribution des surfaces imperméables et perméables. Deuxièmement, le modèle RQSM utilise uniquement l'intensité des précipitations pour décrire le transport des MES. Enfin, la représentativité du modèle RQSM est liée à la précision de la mesure des intensités de précipitation. Par conséquent, une résolution inférieure ou égale à cinq minutes est recommandée pour la mesure des intensités de précipitation.

#### 5.4 Modèle de « rating curve » et modèle exponentiel

Le modèle de « rating curve » et le modèle exponentiel (Huber et Dickinson, 1988) sont des modèles conceptuels éprouvés (Tsihrintzis et Hamid, 1997) qui permettent de calculer les charges de MES à l'exutoire d'un bassin urbain. Ces deux modèles ont été retenus pour fin de comparaison et d'évaluation de la performance du modèle RQSM.

Le modèle de « rating curve » relie la charge de matière en suspension lessivée au débit de ruissellement par l'intermédiaire d'une courbe de tarage (rating curve) ayant pour expression :

$$ml(t) = a Q(t)^b \quad (5.11)$$

où  $ml$  représente la charge de matière en suspension (kg/s);  $Q$ , le débit de ruissellement ( $m^3/s$ );  $a$ , le coefficient de lessivage;  $b$ , le coefficient d'ajustement.

Le modèle de « rating curve » utilise le débit de ruissellement comme seule variable explicative du phénomène de lessivage. Cette formulation a une base physique. En effet, l'augmentation du débit de ruissellement se traduit par l'augmentation de la contrainte

hydraulique de cisaillement à l'interface liquide-solide. Or, la contrainte hydraulique de cisaillement contrôle le potentiel d'arrachement des particules solides sur le bassin. Ce modèle est souvent utilisé comme alternative à des modèles plus complexes lorsque les mesures de charges sont peu nombreuses.

Le modèle de lessivage exponentiel est le modèle utilisé dans le logiciel SWMM. Ce modèle prend en compte la masse de particules solides accumulées. Le calcul de la charge de matière en suspension lessivée par les eaux de ruissellement se fait à l'aide de l'équation suivante :

$$ml(t) = Ma(t) r_l Q(t)^{r_a} \quad (5.12)$$

où  $ml$  représente la charge de matière en suspension (kg/s);  $Ma$ , la masse de particules solides accumulées (kg);  $Q$ , le débit de ruissellement (m<sup>3</sup>/s);  $r_l$ , le coefficient de lessivage;  $r_a$ , le coefficient d'ajustement. Au cours d'un événement pluvieux, l'évolution de la masse de particules accumulées s'exprime sous la forme :

$$Ma(t) = Ma(0) e^{-r_l Q(t)^{r_a} t} \quad (5.13)$$

En supposant un modèle d'accumulation instantanée comme le recommande Kanso *et al.* (2005), l'accumulation initiale  $Ma(0)$  en début de pluie devient un paramètre supplémentaire à caler.

## 5.5 Validation du modèle RQSM

### 5.5.1 Les sites

Le modèle RQSM, le modèle de « rating curve » et le modèle exponentiel ont été calés et validés à l'aide de 285 mesures de charge de MES. Ces mesures ont été réalisées durant 4 événements pluvieux (Bennis, 2000) enregistrés à l'exutoire du sous-bassin (1) de l'arrondissement de Verdun situé sur l'île de Montréal au Canada et de 18 événements pluvieux (Noel *et al.*, 1987) enregistrés à l'exutoire de trois sous-bassins situés dans la ville de Champaign aux États Unis. Pour ces 22 événements pluvieux, l'intensité et le débit à l'exutoire des bassins ont été mesurés au pas de temps de 5 minutes. La Figure 19 montre que les pluies enregistrées sur les 3 sous-bassins de la ville de Champaign ont une période de retour inférieure à 0,5 ans et les pluies enregistrées sur le sous-bassin de Verdun ont une période de retour inférieure à 2 ans.

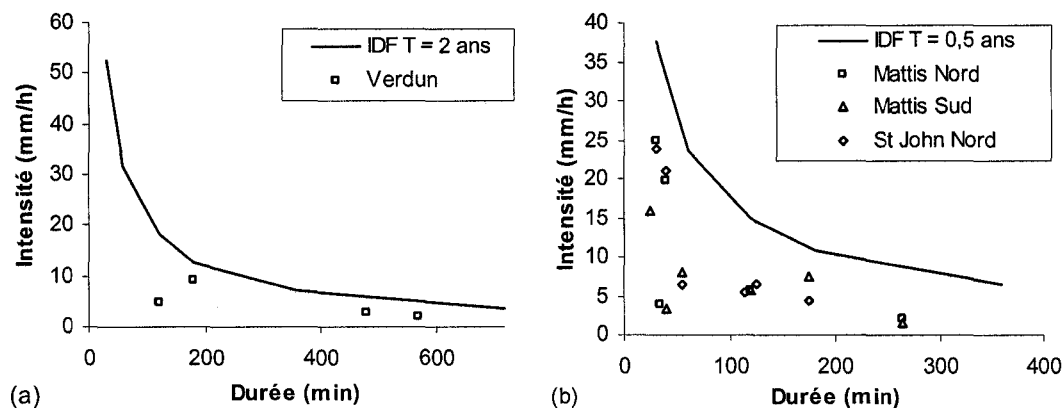


Figure 19 Pluies enregistrées sur, (a), le sous-bassin (1) de l'arrondissement de Verdun et sur, (b), les sous-bassins Mattis Nord, Mattis Sud et Saint John Nord, (Champaign, USA)

Ces pluies ne sont pas des événements exceptionnels. Par conséquent, le calcul de l'énergie cinétique des précipitations a été réalisé suivant les recommandations de Salles *et al.* (2002) en prenant  $\alpha$  égale à 11 et  $\beta$  égale à 1,24. De plus, le calcul de la capacité d'infiltration des surfaces perméables a été réalisé à l'aide du modèle de Horton modifié (Huber et Dickinson, 1988). Ce modèle, couramment utilisé en milieu urbain, tient compte de la capacité initiale d'infiltration du sol ( $f_o$ ), de la capacité finale d'infiltration ( $f_\infty$ ) et de la décroissance temporelle de la capacité d'infiltration ( $K$ ).

Le Tableau XI décrit les caractéristiques physiques des sous-bassins étudiés.

Tableau XI

Caractéristiques physiques des quatre sous bassins  
utilisés pour la validation du modèle RQSM

Bassins	Occupation des sols	$A$ (ha)	$IMP$	$t_c$ (min)	Pente (m/m)	$f_o$ (mm/h)	$f_\infty$ (mm/h)	$K$ (h <sup>-1</sup> )
Verdun	Résidentiel	177,0	0,39	37	0,005	85	25	2
Mattis Nord	Commercial	6,8	0,58	30	0,004	200	33	2
Mattis Sud	Commercial	11,2	0,40	18	0,010	200	33	2
Saint John Nord	Résidentiel	22,1	0,19	24	0,006	200	33	2

Les surfaces, les pentes et l'occupation des sols varient sensiblement d'un sous-bassin à l'autre. La surface des sous-bassins, la fraction de surface imperméable directement drainée, la pente des sous-bassins et les paramètres d'infiltration du modèle de Horton des sous-bassins de Champaign ont été évalués lors des campagnes de mesures. En revanche, les paramètres du modèle de Horton pour le sous-bassin de Verdun et le temps de concentration pour l'ensemble des sous-bassins n'ont pas été mesurés durant les campagnes de mesures. Par conséquent, la valeur de ces caractéristiques physiques a été

estimée à l'aide d'un modèle hydrologique (Bennis et Crobeddu, 2005). Elle peut également être obtenue à l'aide de formules ou de valeurs tabulées (Chow *et al.*, 1988).

### 5.5.2 Calage des trois modèles de lessivage

Les paramètres à caler sont les coefficients de mise en suspension  $Kp_{imp}$  et  $Kp_{per}$  pour le modèle RQSM, les paramètres  $a$  et  $b$  pour le modèle de « rating curve » et les paramètres  $Ma(0)$ ,  $r_l$  et  $r_a$  pour le modèle exponentiel.

La performance d'un modèle de simulation peut être évaluée à l'aide des trois indicateurs suivants :

- le coefficient de *Nash* :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (ml^{Mesuré}(i) - ml^{Simulé}(i))^2}{\sum_{i=1}^m (ml^{Mesuré}(i) - \overline{ml}^{Mesuré})^2} \quad (5.14)$$

La précision de la charge lessivée simulée est d'autant plus grande que le *Nash* est proche de l'unité. En hydrologie urbaine, une simulation précise du débit ruisselé conduit à un *Nash* supérieur à 0,8. Pour la simulation de la qualité des eaux de ruissellement, ce seuil peut être abaissé à 0,6 en raison des nombreuses incertitudes entourant la mesure des polluants (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000) et de la complexité des mécanismes physiques à modéliser.

- le rapport des masses :

$$R_M = \frac{\text{Masse totale lessivée simulée}}{\text{Masse totale lessivée mesurée}} \quad (5.15)$$

- le rapport des pointes :

$$R_p = \frac{ml_{Max}^{Simulé}}{ml_{Max}^{Mesuré}} \quad (5.16)$$

Le coefficient de *Nash* a été retenu comme critère de calage parce qu'il permet de mesurer le niveau de concordance entre les charges mesurées et simulées. Ainsi, le calage des modèles a consisté à choisir la valeur des paramètres qui maximise le nombre de *Nash*. Le choix optimal des paramètres a été réalisé par l'algorithme du simplexe (Lagarias *et al.*, 1998) implémenté dans le logiciel MATLAB.

Les trois modèles de lessivage des MES ont été calés sur le sous-bassin (1) de l'arrondissement de Verdun à l'aide de 2 pollutogrammes mesurés. Pour les trois autres sous-bassins, le nombre plus important d'événements mesurés a permis de caler les modèles à l'aide de 3 pollutogrammes. Dans le cas du bassin de Verdun, un événement dont l'intensité ne dépassait pas la capacité d'infiltration des surfaces perméables a été utilisé pour caler le paramètre  $Kp_{imp}$ . Par la suite, un événement dont l'intensité dépassait la capacité d'infiltration des surfaces perméables a été utilisé pour caler le paramètre  $Kp_{per}$ . En effet, un événement présentant une faible intensité ne sature pas le sol des surfaces perméables. Par conséquent, seules les surfaces imperméables sont lessivées. En revanche, un événement présentant une forte intensité sature le sol des surfaces perméables engendrant le lessivage des surfaces perméables et imperméables. Pour les trois sous-bassins de la ville de Champaign, les événements pluvieux n'étaient pas suffisamment importants pour faire contribuer les surfaces perméables. Par conséquent, seul le coefficient  $Kp_{imp}$  a été calé. Le Tableau XII fournit les valeurs après calage des paramètres des modèles RQSM, « rating curve » et exponentiel.

Tableau XII

Valeur des paramètres après calage des modèles RQSM, « rating curve » et exponentiel

Bassins	Rating Curve		Modèle Exponentiel			RQSM	
	$a$	$b$	$Ma(0)$	$r_l$	$r_a$	$Kp_{imp}$	$Kp_{per}$
Verdun	$8,45 \cdot 10^{-2}$	1,29	2963	$9,89 \cdot 10^{-2}$	1,14	$7,66 \cdot 10^{-6}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$
Mattis Nord	1,41	1,46	552	8,27	1,13	$2,84 \cdot 10^{-5}$	
Mattis Sud	1,05	1,44	100	38,54	1,36	$7,57 \cdot 10^{-6}$	
Saint John Nord	2,26	2,15	273	112,25	2,88	$1,41 \cdot 10^{-5}$	

La valeur des paramètres obtenus appelle deux commentaires. Premièrement, la masse accumulée  $Ma(0)$  du modèle exponentiel et le coefficient de mise en suspension  $Kp_{imp}$  du modèle RQSM ne semblent pas être corrélés à la surface des sous-bassins ou à l'occupation des sols présentés au Tableau XI. Deuxièmement, le paramètre  $r_l$  du modèle exponentiel présente de fortes variations entre les différents sous-bassins. Ces variations s'expliquent en grande partie par l'utilisation d'un modèle d'accumulation instantanée. En effet, les paramètres des modèles RQSM et « rating curve » ont une amplitude de variation moindre que pour le modèle exponentiel alors qu'ils utilisent un modèle d'accumulation infinie.

### 5.5.3 Comparaison des trois modèles de lessivage

Les pollutogrammes de MES fournis par le modèle RQSM, le modèle exponentiel et le modèle de « rating curve » ont été comparés aux 11 pollutogrammes mesurés. La valeur des indicateurs de performance après simulation est fournie au Tableau XIII.

Tableau XIII

Valeur des indicateurs de performance lors de la validation des modèles RQSM, « rating curve » (RC) et exponentiel (EXP)

Événements	<i>Nash</i>			$R_M$			$R_p$		
	RC	EXP	RQSM	RC	EXP	RQSM	RC	EXP	RQSM
V. 30-09-99	-0,05	0,48	0,25	0,71	0,99	0,66	0,51	0,55	0,56
V. 13-10-99	0,49	0,06	0,70	0,85	1,36	0,98	0,74	1,16	1,02
M. N. 17-05-80	0,81	0,85	0,46	1,23	1,44	0,79	0,87	1,03	0,64
M. N. 23-05-80	-2,39	0,12	0,89	3,22	2,24	1,13	2,49	1,56	1,24
M. N. 01-06-80	-1,47	-2,14	0,42	2,80	3,02	1,54	1,75	2,26	0,99
M. S. 01-06-80	-0,22	0,92	0,52	2,37	1,32	1,29	1,97	1,26	0,69
M. S. 23-06-80	-1,19	0,51	0,88	2,31	0,63	0,99	2,34	1,02	0,90
M. S. 28-06-80	0,73	0,98	-0,07	1,43	0,92	0,47	1,06	0,91	0,19
S. J. N. 17-05-80	0,88	0,80	0,65	0,76	0,58	1,50	0,95	0,86	1,21
S. J. N. 30-05-80	0,90	0,76	0,88	0,73	0,54	1,03	0,94	0,81	0,82
S. J. N. 01-06-80	0,88	0,79	0,26	0,89	0,83	1,48	1,09	1,20	0,66

Le coefficient de *Nash* est supérieur à 0,6 pour 6 événements simulés à l'aide du modèle exponentiel et pour 5 événements simulés à l'aide du modèle RQSM et « rating curve ». Par conséquent, les trois modèles ont fourni un pollutogramme proche du pollutogramme mesuré pour 50% des événements mesurés. L'erreur sur la masse de MES lessivée est inférieure à 30% pour 6 événements simulés à l'aide du modèle RQSM et « rating curve » comparativement à 3 événements simulés à l'aide du modèle exponentiel. Par conséquent, le modèle RQSM a modélisé la masse de MES lessivée de manière équivalente au modèle de « rating curve » mais mieux que le modèle exponentiel. L'erreur sur la pointe du pollutogramme est inférieure à 30% pour 8 événements simulés à l'aide du modèle exponentiel et pour 6 événements simulés à



l'aide du modèle RQSM et « rating curve ». Par conséquent, le modèle RQSM a modélisé la pointe du pollutogramme de manière équivalente au modèle de « rating curve » mais moins bien que le modèle exponentiel.

Les Figure 20 et la Figure 21 présentent deux événements simulés par le modèle RQSM, exponentiel et « rating curve ».

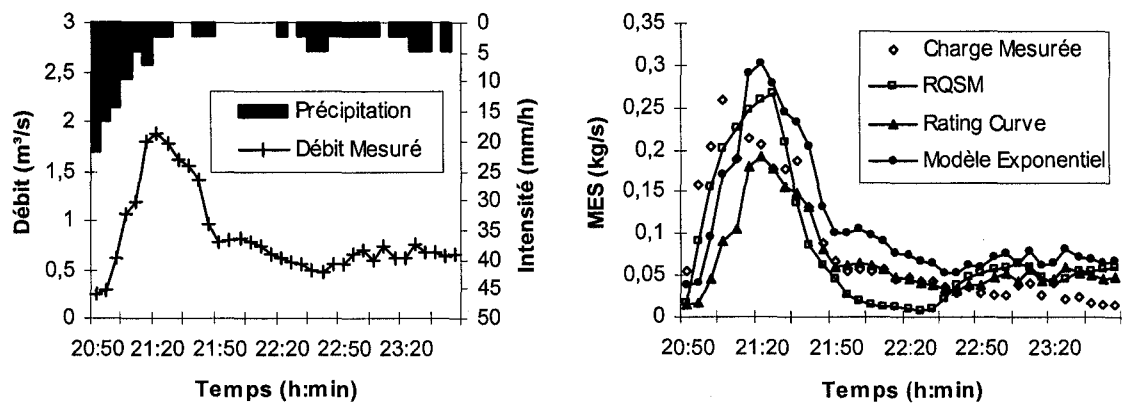


Figure 20 Pluie du 13 octobre 2000 sur le sous-bassin (1) de l'arrondissement de Verdun

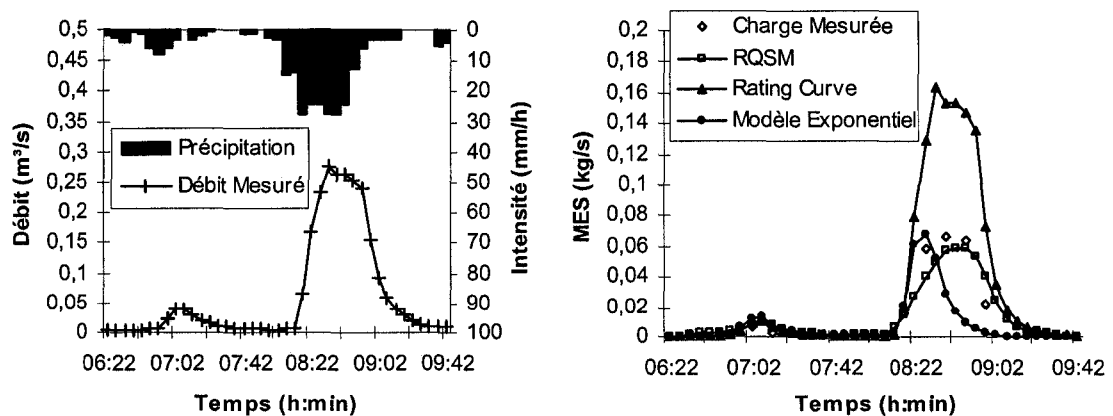


Figure 21 Pluie du 23 juin 1980 à South Mattis

Ces deux événements montrent que la corrélation entre le hyétogramme et le pollutogramme n'est pas indispensable pour que le modèle RQSM fournisse de bons résultats. En revanche, une bonne corrélation entre hydrogramme et pollutogramme permet au modèle exponentiel et « rating curve » de bien reproduire la forme du pollutogramme. Néanmoins, elle n'est pas synonyme d'une bonne estimation de la charge de MES lessivée comme le montre la Figure 21 pour le modèle de « rating curve ».

La comparaison des trois modèles sur la base de résultats événementiels peut être trompeuse puisqu'elle masque la présence de disparités ou de biais dans les résultats. Afin d'avoir une vision plus représentative de la performance des modèles RQSM, exponentiel et « rating curve », la valeur moyenne des indicateurs de performance et leur écart-type sont présentés au Tableau XIV.

Tableau XIV

Moyenne et écart-type des valeurs de  $Nash$ ,  $R_p$  et  $R_M$ 

Modèles	$Nash$		$R_M$		$R_p$	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Rating Curve	-0,06	1,14	1,57	0,93	1,34	0,68
Modèle Exponentiel	0,33	0,93	1,26	0,77	1,15	0,45
RQSM	0,53	0,31	1,08	0,35	0,81	0,31

Le nombre d'événements simulés n'apparaît pas suffisant pour pouvoir statistiquement prouver la supériorité d'un modèle sur un autre. Néanmoins, quelques remarques qualitatives peuvent être émises. Premièrement, les trois modèles ne simulent pas parfaitement les pollutogrammes de MES. En effet, le  $Nash$  moyen pour l'ensemble des événements simulés est inférieur à 0,6. Deuxièmement, le modèle exponentiel et le

modèle de « rating curve » ont surestimé la charge lessivée. En effet, le  $R_M$  moyen est proche de 1 pour le modèle RQSM alors qu'il est de 1,26 pour le modèle exponentiel et de 1,57 pour le modèle de « rating curve ». Troisièmement, le modèle RQSM a sous estimé le rapport des pointes alors que le modèle exponentiel et le modèle de « rating curve » le surestime. Enfin, les trois modèles de lessivage présentent une forte variabilité. En effet, les écarts types sur le  $Nash$ ,  $R_p$  et  $R_M$  s'échelonnent de 0,31 à 1,14. Ces résultats mitigés sont la conséquence de quatre sources d'incertitudes différentes. La première source d'incertitude provient de l'incertitude associée aux mesures des précipitations, des débits ruisselés et surtout, des charges de MES (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). La deuxième source d'incertitude résulte de la méconnaissance des processus d'accumulation des particules solides sur les surfaces imperméables durant la période de temps sec. La troisième source d'incertitude provient de l'absence de description des processus de déposition et de remise en suspension des particules solides durant la phase de transport. Enfin, la quatrième source d'incertitude résulte de l'utilisation des modèles sur des sous bassins non uniformes en terme de rugosité, de pente et de distribution des particules solides.

## 5.6 Analyse de sensibilité du modèle RQSM

L'analyse de sensibilité a porté sur les paramètres de calage  $Kp_{imp}$ ,  $Kp_{per}$  et sur les paramètres physiques  $t_c$ ,  $f_o$ ,  $f_\infty$ ,  $K$ . En effet, la valeur mesurée ou calculée de ces quatre paramètres physiques est souvent entourée d'une grande incertitude. La sensibilité de ces six paramètres a été évaluée en considérant le coefficient de  $Nash$ .

La démarche retenue a consisté à attribuer des valeurs de référence aux six paramètres étudiés. Ces valeurs de références sont présentées au Tableau XV.

Tableau XV

Valeurs de référence des paramètres  
pour l'analyse de sensibilité du modèle RQSM

Paramètres	$A$	$IMP$	$t_c$	$f_o$	$f_\infty$	$K$	$Kp_{imp}$	$Kp_{per}$
Valeurs	100	0,5	32	160	16	4	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Elles ont servi à calculer un pollutogramme de référence. Par la suite, une variation a été imposée à une des valeurs de référence du modèle RQSM. Le nouveau pollutogramme ainsi obtenu a été utilisé avec le pollutogramme de référence pour calculer le *Nash* correspondant.

L'analyse de sensibilité a été menée à l'aide des deux pluies suivantes :

- pluie (1) :  $I = 10$  mm/h; durée : 240 min.
- pluie (2) :  $I = 80$  mm/h; durée : 25 min.

La pluie (1) génère une hauteur d'eau inférieure à la capacité d'infiltration des surfaces perméables définie par les paramètres de référence du modèle RQSM. En revanche, la pluie (2) génère une hauteur d'eau supérieure à la capacité d'infiltration des surfaces perméables. Par conséquent, la pluie (1) lessive uniquement les surfaces imperméables alors que la pluie (2) lessive les surfaces perméables et imperméables.

Les résultats de l'analyse de sensibilité pour la pluie (1) sont présentés à la Figure 22 (a).

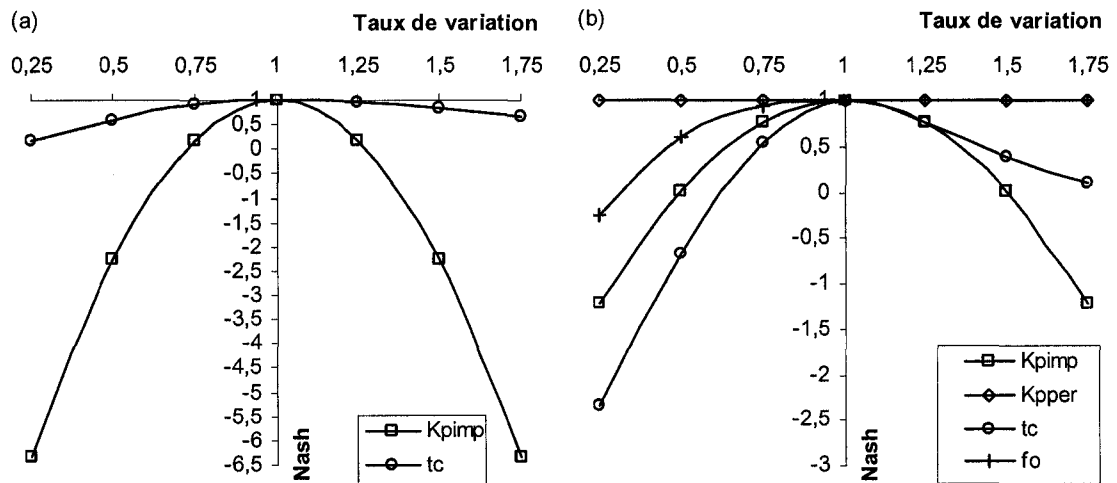


Figure 22 Variation du Nash en fonction du taux de variation des paramètres du modèle RQSM pour, (a), la pluie (1) et, (b), la pluie (2)

Ils amènent deux remarques importantes. Premièrement, la variation du paramètre  $Kp_{imp}$  engendre une forte augmentation du coefficient de *Nash*. Par conséquent,  $Kp_{imp}$  doit être minutieusement calé. Enfin, la variation du temps de concentration engendre une faible diminution du *Nash*. Par conséquent, une valeur approchée de  $t_c$  peut être utilisée pour les pluies de faible intensité et de durée supérieure à  $t_c$ .

Les résultats de l'analyse de sensibilité pour la pluie (2) sont présentés sur la Figure 22 (b). Ils amènent quatre remarques importantes. Premièrement, la variation du paramètre  $Kp_{imp}$  engendre une forte diminution du *Nash* comme pour la pluie (1). En revanche, la variation du paramètre  $Kp_{per}$  ne fait pratiquement pas diminuer le *Nash*. Néanmoins, ce paramètre peut devenir influent en cas de pluie extrême ou pour une surface perméable présentant une faible capacité d'infiltration. Deuxièmement, la variation de  $t_c$ , dans le cas d'une pluie de durée supérieure à  $t_c$ , génère une plus grande diminution du *Nash* que la variation de  $Kp_{imp}$ . En revanche, l'influence de  $t_c$  diminue significativement et devient même inférieure à celle de  $Kp_{imp}$  quant la durée de la pluie est inférieure à  $t_c$ . Troisièmement, une variation importante de la capacité initiale d'infiltration ( $f_o$ ) entraîne

une importante baisse du *Nash*. De plus, la sous-estimation de la capacité initiale d'infiltration entraîne une diminution du *Nash* plus importante que sa surestimation. Enfin, la variation de la capacité finale d'infiltration ( $f_{\infty}$ ) et du coefficient de décroissance ( $K$ ) a entraîné une diminution négligeable du *Nash*. Par conséquent, la variation de ces paramètres n'a pas été présentée sur la Figure 22 (b) afin de alléger la lecture. Ces résultats sur les paramètres d'infiltration du modèle de Horton sont similaires aux observations faites suite à l'analyse de sensibilité du modèle de réservoir non linéaire du logiciel SWMM (Liong *et al.*, 1991).

## 5.7 Conclusion

Le présent article a mis en lumière une approche conceptuelle originale pour modéliser la charge de matière en suspension lessivée sur les bassins urbains. L'originalité du modèle RQSM découle d'une part, de l'utilisation de l'énergie cinétique des précipitations pour modéliser la mise en suspension des particules solides, et d'autre part, de l'emploi de la théorie des systèmes linéaires pour décrire le transport des MES à la surface du bassin.

Le modèle RQSM présente trois atouts. Premièrement, il utilise uniquement l'intensité des précipitations pour calculer la charge de MES lessivée à l'exutoire d'un bassin urbain. Deuxièmement, il dissocie la contribution en MES des surfaces perméables et imperméables. Enfin, seuls deux paramètres du modèle RQSM nécessitent un calage.

Le modèle RQSM a simulé les charges de MES mesurées, à l'exutoire de 4 sous-bassins urbains situés en Amérique du Nord, avec un niveau de précision équivalent à celui de deux modèles conceptuels éprouvés. L'analyse de sensibilité du modèle RQSM a montré que deux paramètres avaient un impact significatif sur le pollutogramme simulé.

Les résultats encourageants obtenus à l'aide du modèle RQSM permettent d'envisager une extension de son utilisation à d'autres polluants.

MCours.com