

Modélisation du volume sédimentaire des ouvrages de rétention d'eaux pluviales : développement d'un outil de gestion

Sediments volume modeling of urban stormwater management: development of a decision-making tool

Anabelle Fontan ^{1,2}, Dominique Pontet ¹, Jean-François Lenain ², Barthélémy Chauvet ¹, Marilyne Soubrand ² et Emmanuel Joussein ²

¹ Limoges Métropoles, Direction de l'assainissement et des espaces naturels, 64 avenue Georges Dumas, BP 3120, 87031 Limoges Cedex 1.

Anabelle.fontan@gmail.com, dominique_pontet@agglo-limoges.fr, barthelemy_chauvet@agglo-limoges.fr

² Université de Limoges, GRESE « Groupement de Recherche Eau - Sol - Environnement », FST- EA 4330, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges.

Jean-françois.lenain@unilim.fr; marilyne.soubrand@unilim.fr; emmanuel.joussein@unilim.fr

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel d'urbanisation croissante, les sols anciennement récepteurs des eaux de pluie ne peuvent plus jouer ce rôle en raison de la forte imperméabilisation entre autres des agglomérations. La mise en place d'une politique pluviale a engendré la création d'ouvrages de rétention des eaux de ruissellement afin d'écrêter les crues et assurer un relargage régulé de l'eau dans le milieu naturel. Cependant, ces bassins se combleront logiquement année par année de sédiments (résidus de ruissellement, gravats...) entraînant une diminution de leur efficacité voir un effet inverse. Il est donc nécessaire de curer ces bassins. Pour cela, les gestionnaires doivent pouvoir estimer le volume sédimentaire le plus précisément possible pour appréhender les coûts engendrés par cette opération. Cette étude a pour but de développer un outil décisionnaire permettant la détermination du volume sédimentaire disponible à partir d'une approche géostatistique qui se veut rapide, précise et généralisable à tous types de bassin.

ABSTRACT

In the current context of growing urbanization, stormwater is channeled to a retention basin through a system (street, parking ...) and a network of drain or underground pipes. The basins are designed to allow relatively large flows of water to enter, but discharges to receiving waters are limited by outlet structures that function only during very large storm events, then to ensure a controlled release of water in the natural environment. However, these basins are filled by a large amount of sediments (residue runoff, rubble ...) along the time inducing a decrease of their efficiency. It is therefore necessary to clean out these basins. To do this, managers must be able to (i) better estimate the sediments volume as accurately as possible, and then (ii) estimate the costs of this operation. This study aims to develop a fast, accurate and generalizable decision-making tool for determining the volume of sediment available from a geostatistical approach.

MOTS CLES

Géostatistiques, Modélisation, Outil de gestion, Volume de sédiments

1 INTRODUCTION

Les sols anciennement récepteurs des eaux pluviales sont de plus en plus imperméabilisés (construction de routes, parking, ...) en raison de la démographie croissante. Par conséquent, la surface d'infiltration disponible est amoindrie et les eaux ruissellent sur des surfaces imperméabilisées avant de rejoindre les cours d'eau. Ceux-ci reçoivent donc un débit d'eau plus important et peuvent entrer en crue. La mise en place d'une véritable politique pluviale a permis la création de réseaux séparatifs de collecte et la création d'ouvrages de rétention des eaux de ruissellement dont le rôle est l'écrêtement des crues afin d'éviter les inondations.

Ces ouvrages ont pour rôle de stocker les eaux de pluie avant de les restituer au milieu naturel soit par infiltration, soit directement en les rejetant dans le cours d'eau à un débit régulé défini et compatible avec les capacités hydrauliques du milieu récepteur. De plus, ces bassins font office de décanteurs en stockant les matériaux particuliers sous forme sédimentaire. Par conséquent, année après année, ces bassins se remplissent de matériaux qu'il est nécessaire de curer pour leur bon fonctionnement. Or, il n'existe à ce jour, aucune réglementation spécifique à la surveillance et la gestion des sédiments d'assainissement pluvial. Actuellement, des méthodes existent pour déterminer le volume sédimentaire à curer dans les bassins. Ces méthodes prennent généralement en compte la quantité de matière qui arrive à l'année, l'environnement du bassin et le délai entre deux curages. Cependant ces méthodes ne sont pas précises puisque ne permettent pas de prendre en compte des épisodes exceptionnels ou des changements de milieu. Ainsi il est difficile de déterminer le volume sédimentaire précisément et de manière rapide.

Le but de cette étude est de développer un outil décisionnaire à partir d'une méthode rapide et facile à mettre en place dans le but de déterminer le volume sédimentaire disponible à partir d'une approche géostatistique. Pour cela, un bassin de rétention des eaux pluviales de l'agglomération de Limoges a été utilisé comme bassin test afin de mettre au point la méthodologie *in situ* et ensuite le traitement mathématiques des données.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 Site d'étude et zonage

Le site d'étude situé dans une zone d'activité commerciale et industrielle en Haute Vienne (87) est un ouvrage de rétention des eaux pluviales de type bassin ouvert (Figure 1a), mis en place comme outil compensatoire de cet aménagement foncier dès le début des années 2000. Il totalise un volume de 9000 m³ calé sur une période de retour décennale. Le bassin comporte 3 entrées, la principale étant celle située en bas de la Figure 1.

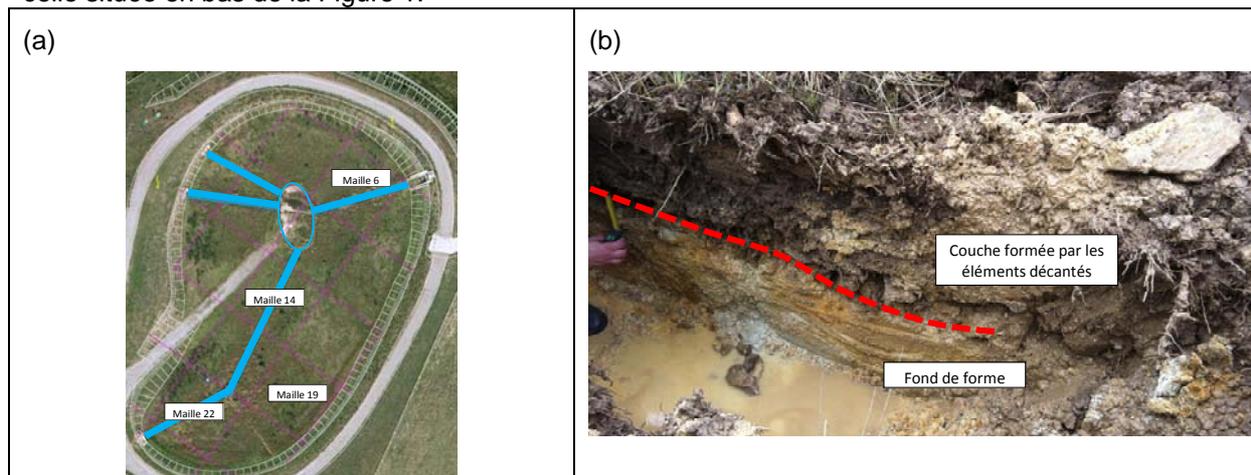


Figure 1 (a) bassin de rétention d'eaux pluviales étudié avec en bleu les chenaux principaux d'écoulement, ainsi que le dessableur central. Les mailles de 20*20 m ont également été délimitées ; (b) structure des matériaux au sein du bassin de rétention avec couche formée par une couverture de terre végétale et d'éléments décaantés, le fond de forme en argile et la limite entre ces 2 matériaux.

Les eaux convergent ensuite vers les chenaux (symbolisés en bleu) pour aller vers le dessableur central puis se réunissent dans le dernier chenal pour passer dans l'ouvrage de régulation protégé par

un dessableur siphoné qui retient les objets flottants. Le régulateur de débit de sortie est un ajustage dont le diamètre est de 300 mm. L'ouvrage de régulation est muni d'un trop plein en cas de trop forte pluie et d'un clapet qui viendra obturer l'ouverture en cas de pollution accidentelle afin d'isoler le bassin du milieu naturel. Le fond du bassin a été recouvert de terre végétale. Le fond de forme est quant à lui constitué d'une strate argileuse dure et compacte aisément déterminable par pénétrométrie (Figure 1b). Le bassin présente une longueur d'environ 113 m pour une largeur de 68 m. Une rampe d'accès latérale est positionnée afin d'effectuer la maintenance. Ainsi, de par ses caractéristiques, ce bassin a permis de mettre en place assez aisément la méthodologie de mesure sans réellement modifier son fonctionnement. Dans le but de mettre au point finement la méthode d'estimation, le site a été découpé en plusieurs mailles carrées de 20*20 m (cf. Figure 1).

2.2 Topographie du site

Le bassin de rétention a été cartographié (coordonnées x, y et z) à l'aide d'un Leica Rugby 100 HI à partir d'un point de niveau de référence d'altitude connue (322,63 m selon le nivellement général de la France NGF). Afin de replacer les points de mesure sur un maillage 3D, les points intersections de chacune des mailles ont également été déterminés. Ensuite le niveau laser a été positionné sur ce point de niveau de référence pour chacune des mesures de profondeur de sédiment à partir de la canne pénétrométrique. Il est à noter que la précision du laser est de +/- 1,5 mm à 30 m.

2.3 Méthodologie de mesure

La hauteur de sédiment a été mesurée à l'aide d'une canne pénétrométrique graduée. Cette canne est enfoncée progressivement dans le sol jusqu'au changement de dureté (modification de la pression d'enfoncement) correspondant au fond de forme (cf Figure 1a). Le récepteur laser placé sur la canne pénétrométrique permet de déterminer une profondeur d'enfouissement (équivalent à une profondeur de sédiment) en chaque point. A partir de cette mesure d'enfouissement, il est possible de définir l'épaisseur de sédiment par différence avec la surface des sédiments.

Deux étapes de mesure de hauteurs ont été réalisées :

- (i) une approche fine de mesure sur 4 mailles de 20*20 m (cf. Figure 1a). Dans ce cas des mesures ont été effectuées tous les mètres sur l'ensemble de ces 4 mailles. Ces mailles ont été sélectionnées en raison de leur représentativité du site.
- (ii) une approche de généralisation de la méthode avec cette fois ci des mesures réalisées tous les 10 m sur l'ensemble du site d'étude.

Ainsi l'ensemble de ces points permet d'obtenir un maillage à différentes échelles soit 1 m, 5 m, 10 m et 20 m.

2.4 Traitement des données par approche géostatistique

Les données ont été traitées par variographie à l'aide du logiciel Systat 12® (Systat Software Inc., 2007). La variographie fournit une idée de la variance en fonction de la distance entre les points de mesure. Certaines zones ont été cartographiées avec une maille très fine pour modéliser cette dépendance. L'idée est de ne mesurer que les corrélations spatiales intrinsèques. Pour cela il faut en quelque sorte mettre au préalable le terrain « à plat » pour éliminer l'effet des tendances générales (les pentes) car toute tendance entraîne une dépendance artificielle entre les mesures (Simonoff, 1996). Ces tendances sont évaluées par des surfaces obtenues de manière générale ou locale grâce au modèle (Equation 1) :

$$\text{Altitude}_i \text{ (ou Epaisseur}_i) = \text{Régression spatiale (x}_i, y_i) + \text{écart}_i \quad \text{Equation 1}$$

Ces écarts à la surface de régression constituent les « erreurs » statistiques sur lesquelles la variographie est ensuite réalisée. Les tendances générales sont estimées par ajustement d'un modèle polynomial de degré 3 à la surface considérée (Dagnélie, 2007). Les tendances locales sont-elles estimées par des méthodes dites « à noyau », ou la régression se fait à l'intérieur d'une fenêtre glissante. Ces méthodes diverses (Nadaraya-Watson, modèle linéaire local, splines...) ont en commun une pondération en fonction de la distance (Bates and Watts, 2007). Elles créent automatiquement un modèle différent à l'intérieur de chaque zone constituée par la fenêtre de mesure.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Modélisation de la surface à l'échelle de la maille

Avant de modéliser le bassin total, il est nécessaire de travailler à une échelle plus restreinte avec un grand nombre de points afin de déterminer les variations locales et savoir comment s'en affranchir par traitement sans pour autant perdre trop d'informations surfacique et par conséquent volumique. Un exemple de résultats obtenus pour la maille 22 est reporté Figure 2.

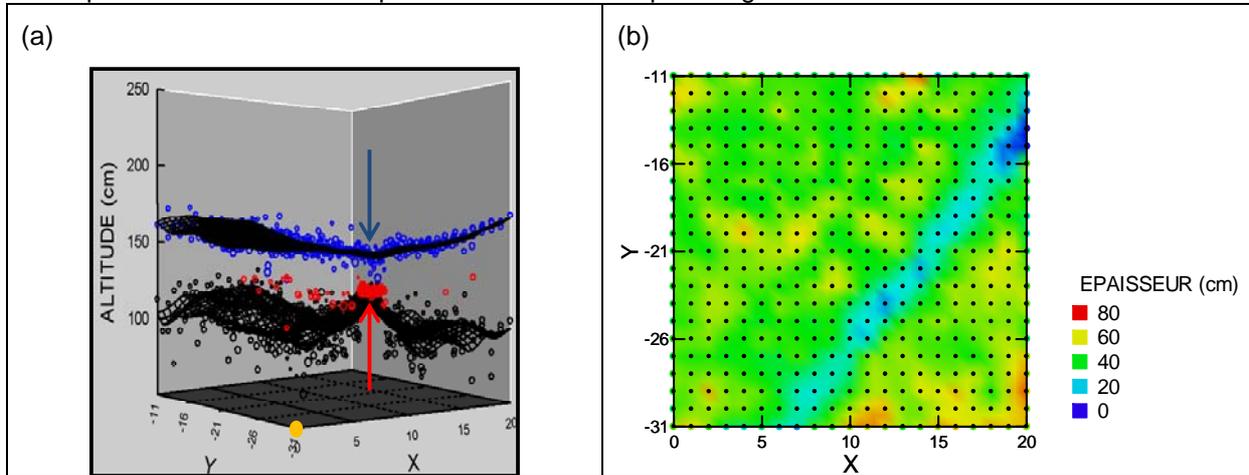


Figure 2 (a) représentation des surfaces du fond de forme (points noirs) et de la surface des sédiments (points rouges) de la maille 22 ; (b) modélisation 2D de l'épaisseur de sédiment correspondant.

Cette Figure représente la topographie du fond de forme du bassin et la surface des sédiments. Ceci matérialise bien les variations locales ainsi que le passage du chenal qu'il faut prendre en compte dans la modélisation du volume sédimentaire. Ceci est facilement mis en évidence par la modélisation 2D de l'épaisseur de sédiment pour cette même maille avec le passage du chenal en bleu (moins d'épaisseur de sédiment).

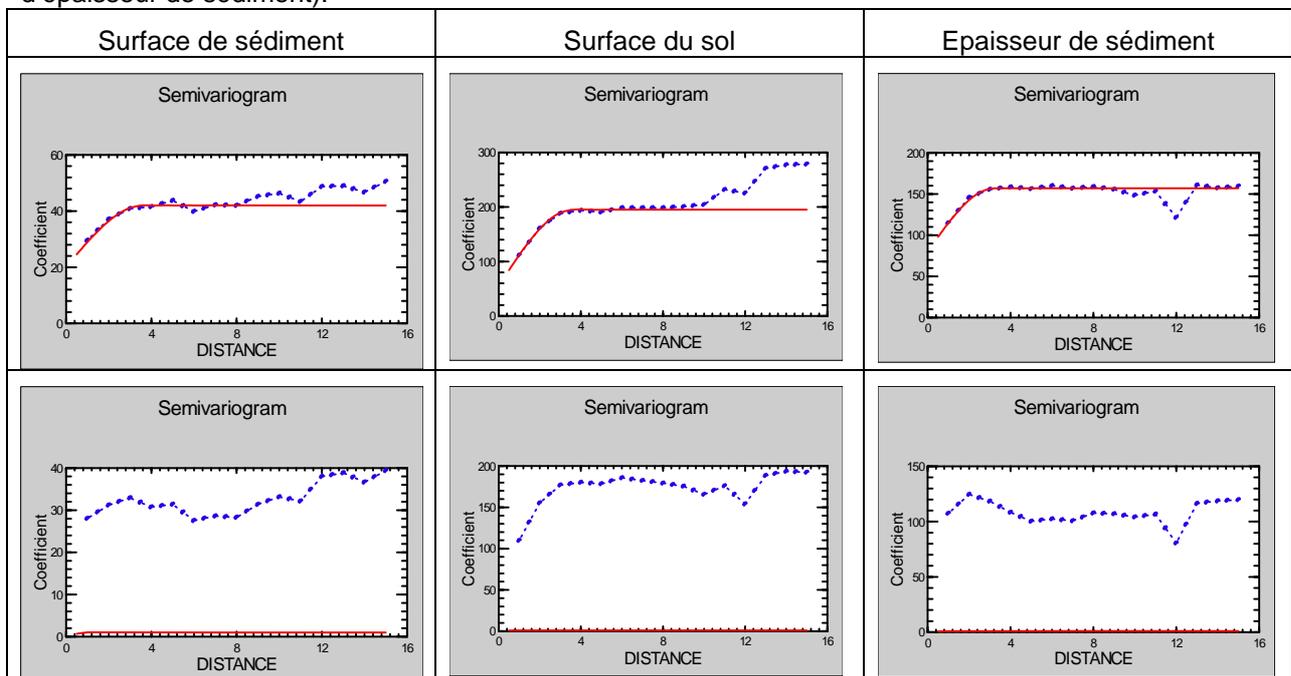


Figure 3 Variogrammes de la maille 22 (points 1*1m) en termes de surface de fond de forme, surface des sédiments et épaisseur de sédiment. Les 2 lignes du tableau correspondent respectivement aux données corrigées par régression polynomiale, et aux données corrigées par régression locale.

Les méthodes de régression générales ne sont pas toujours bien adaptées aux variations constatées : zones d'accumulation, canaux, chenaux sont autant d'irrégularités fortes que ces méthodes ne

parviennent pas à prendre en compte. Le fond du bassin montre des zonations séparées par des variations brusques d'altitude que l'on retrouve sur les variogrammes (Figure 3).

En surface les variations sont plus régulières. Cependant l'ajustement n'est pas optimal dans les zones d'accumulation ou le modèle de régression est exponentiel plutôt que polynomial (Cressie, 1993). La régression locale prend plus aisément en compte les variations rapides, mais est plus délicate à mettre en œuvre. Elle offre au final des variogrammes plus représentatifs de la variabilité. Les variogrammes obtenus après régression sont souvent bien ajustés par un modèle sphérique (eg Figure 3 pour la maille 22). Le plateau du graphe correspond à la variance réelle de l'altitude ou de l'épaisseur. Cette variance diminue pour les distances faibles sous l'effet de la dépendance spatiale. La projection pour une distance égale à 0 correspond à la variabilité locale. Elle cumule la précision de mesure d'altitude et les irrégularités du terrain à très courte échelle. Nous la considérerons d'une manière pratique comme la précision effective de la mesure à la sonde pour le terrain considéré. Le plateau apparaît à partir de 3 m. Par conséquent, pour une distance entre mesures supérieure à 3m, ces mesures peuvent être considérées comme indépendantes ; entre 2 et 3m de distance entre points la dépendance est faible et peut être négligée en pratique.

- Les mailles étudiées en modélisant le fond de forme peuvent être positionnées sur le bassin (Figure 4).

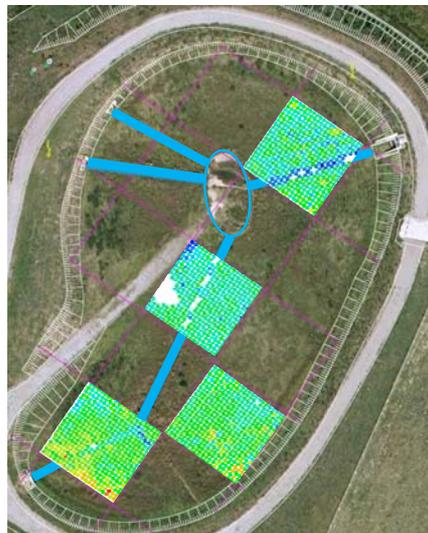


Figure 4 Modélisation des épaisseurs de sédiment pour les mailles 20*20 m et 10*10 m sélectionnées.

Il est constaté que la modélisation permet de rendre compte aisément des irrégularités du terrain, du passage du chenal et du déssableur. La profondeur semble être moins importante sur les bords du bassin ce qui semble être en accord avec les données techniques. Par conséquent, ceci permet entre autre de bien mettre en évidence que le traitement géostatistique réalisé par variographie est bien représentatif du terrain.

3.2 Modélisation de la surface à l'échelle du bassin

La Figure 5 permet de rendre compte de la modélisation intégrale de l'épaisseur de sédiments sur l'ensemble du bassin de rétention d'eaux pluviales à partir du maillage à 10 m. Les résultats obtenus sont bien en adéquation avec les données techniques ainsi que les données expérimentales obtenues sur le bassin. Cette figure montre bien : l'irrégularité du fond, la remontée du fond vers les bords, la rampe d'accès au déssableur et enfin les zones de sédimentation plus marquées au niveau des freins hydrauliques naturels.

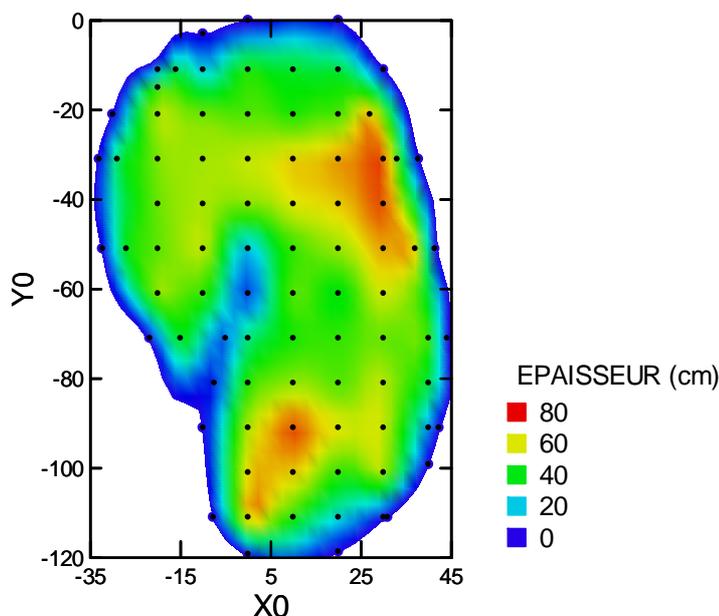


Figure 5 Modélisation de l'estimation locale de l'épaisseur de sédiment pour une grille 10m*10m.

Il faut noter que les chenaux ne sont pas détectés avec cette grille de 10m en raison du lissage statistique important à cette échelle. Cependant ceci permet quand même de rendre compte de la réalité.

3.3 Détermination du volume sédimentaire

A partir de l'approche géostatistique du système et de la modélisation des surfaces et épaisseurs, il est ainsi possible de déterminer un volume de sédiments avec une erreur de mesure fonction de la tolérance choisie. Les résultats concernant l'épaisseur sont obtenus sur le terrain tout entier à partir de la maille 20*20 m et 10*10 m. Ainsi, pour la surface du bassin, le volume de sédiments est estimé à 3263 m³.

L'écart-type de l'épaisseur calculé sur les données brutes incorpore les disparités entre zones et dépasse nettement la valeur de la zone la plus variable (zone 22 : 12,5 cm). Il est donc important d'obtenir une estimation correcte de la variabilité pour diminuer l'incertitude et les risques associés. Cette variabilité doit être compensée par un nombre de points suffisants pour une bonne estimation du volume total.

3.4 Validation de la méthode

De part cette méthode, il n'y a pas de limitation pour l'estimation du volume au seul modèle du krigeage géostatistique. L'utilisation d'un maillage de 2 m minimum permet d'estimer la variabilité du volume par des méthodes simples, sans le biais du à la dépendance spatiale. Ce sera donc le cas pour la plupart des situations pratiques. Le Tableau 1 reporte les résultats de variabilité obtenus soit localement soit par exemple pour une distance de 4 m avec deux types de régression statistique. D'après les résultats précédents, cette variabilité estimée pour 3 m minimum entre mesures sera la variabilité utilisée en pratique.

Tableau 1 Variabilité des mesures au sein des 4 mailles étudiées.

Ecart-type (cm)	local	à 4 m	
		Régression polynomiale	Régression locale
Surface de sédiment	2,5 à 5	3 à 6,5	3 à 5,5
Surface du fond de forme	5,5 à 11	7,5 à 13,5	6 à 11
Epaisseur	5 à 10	7,5 à 12,5	7 à 11,5

Les données permettent de bien mettre en évidence que la sédimentation « lisse » les inégalités de terrain de la surface du fond de forme. Les écarts-types varient du simple au double suivant les zones étudiées. La variance de l'épaisseur est voisine de celle du fond de forme. La précision pratique de la mesure à la canne pénétrométrique est en moyenne d'environ 5 cm pour la surface et de 10 cm pour la profondeur qui correspondent respectivement à des intervalles de confiance à 95% de ± 10 cm et ± 20 cm. Ceci a bien été matérialisé par les résultats de modélisation ci-dessus qui reflètent bien la réalité du terrain. Par conséquent cette méthode est efficace pour la détermination du volume de sédiment et peut être utilisée en tant qu'outil de gestion avec une bonne sensibilité de l'ordre du centimètre quand la maille est réduite.

3.5 Outil de gestion

La création d'un outil de gestion des bassins de rétention d'eaux pluviales à partir de cette méthode peut ainsi être envisagée. Pour cela, il doit être robuste, rapide de mise en place et fiable à la fois pour la détermination du volume de sédiment en place ou à curer ce qui n'est pas forcément la même chose. Il est nécessaire de réduire au maximum le nombre de mesures à réaliser tout en restant fiable sur la détermination des volumes. Dans ce but il est proposé d'utiliser les variogrammes issus de la régression polynomiale qui sont plus simples à obtenir. Les variances y sont légèrement surévaluées.

Il faut distinguer l'estimation du volume du sédiment en place de l'estimation du volume à curer. Dans le second cas, une fois les côtes définies, la tolérance et le risque associé ne dépendent que de la mesure de surface du sédiment, quel que soit l'épaisseur à éliminer. Les valeurs sont donc les mêmes quel que soit le volume/ha à évacuer. Si P est la loi cumulée de Gauss (loi Normale cumulée), une bonne approximation du risque unilatéral (pour $N > 30$) est alors donnée par l'Equation 2 où la tolérance est l'écart admissible entre le volume estimé et le volume réel à curer (qui lui est inconnu), et $s(m)$ l'écart-type de la moyenne des N points.

$$1-P(\text{tolérance} / s(m)) \quad \text{Equation 2}$$

Ainsi si $s(ep)$ est l'écart-type de la mesure d'épaisseur de sédiment en cm, l'écart-type du volume en m^3/ha sera défini par l'Equation 3 :

$$s(\text{vol}) = 100 * s(ep) \quad \text{Equation 3}$$

Dans ce cas, l'Equation 4 permet pour N points de mesure de déterminer l'écart-type de la moyenne :

$$s(m) = s(\text{vol}) * N^{-0.5} \quad \text{Equation 4}$$

Ainsi pour 1 ha, on obtient donc les Equations 5 et 6 suivantes :

$$N = (100m / G)^2 \quad \text{Equation 5}$$

et donc :

$$s(m) = s(ep) * G \quad \text{Equation 6}$$

Ceci permet d'en déduire une expression simple du risque (Equations 7 et 8) en fonction de la grille (avec $s(ep)$ en cm et G en m) :

$$\text{Risque unilatéral} = 1 - P(\text{tolérance} / [s(ep) * G]) \quad \text{Equation 7}$$

et réciproquement :

$$\text{Tolérance} = P^{(-1)}(1-\text{risque}) * s(ep) * G \quad \text{Equation 8}$$

Ces relations permettent de calculer l'un des paramètres risque, tolérance, grille en fonction des deux autres, et de construire des abaques. Dans un cas bilatéral le risque est à diviser par deux dans ces relations (un risque bilatéral de 5% correspond à un risque unilatéral de 2,5%). Pour un risque fixé, la tolérance et la grille sont proportionnelles. Par contre, si l'on souhaite diviser par deux la tolérance il est alors nécessaire de diviser par deux la grille, c'est-à-dire réaliser 4 fois plus de mesures.

A partir de ceci, il est alors possible de construire en fonction de la demande des abaques : (i) du volume de sédiment en place, ou (ii) du volume de sédiment à curer (Figures 6a et 6b respectivement).

Dans le cas du volume de sédiment en place (Figure 6a), donc en prenant en compte la variabilité de l'épaisseur de la couche sédimentaire, l'écart-type moyen est d'environ 10 cm. Cet abaque indique l'intervalle de confiance du volume estimé (incertitude en m^3/ha), au risque choisi et pour un maillage déterminé. Par exemple, pour une maille de 5 m (soit un point de mesure tous les 5 m sur le bassin) et

un risque de 5%, le volume sera estimé avec un intervalle de confiance à 95% d'environ $\pm 100 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Dans le cas du volume de sédiment à curer (Figure 6b), le risque est économique donc surtout de sous-évaluer. C'est donc un risque de type unilatéral. Le risque calculé est par conséquent celui d'un volume réel supérieur à l'estimation et ceci pour un écart-type moyen arbitraire de 5 cm en épaisseur. Une grille de 15 m permet d'obtenir seulement une tolérance de $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ avec un risque élevé de 10% de dépasser ces $100 \text{ m}^3/\text{ha}$. A l'opposé une grille de 5 m offre un risque inférieur à 5% de dépasser une tolérance de $40 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Ainsi à partir de ces abaques, l'estimation du volume pour le bassin considéré à partir d'une maille de $10 \times 10 \text{ m}$ en guise d'exemple est la suivante. Le volume du bassin est estimé à 3263 m^3 pour une surface totale de 5800 m^2 et une épaisseur moyenne de $56,3 \text{ cm}$. Sur la base d'un écart-type moyen de 10 cm , le risque usuel de 5% donne l'intervalle de confiance à 95%. D'après la Figure 6a cette incertitude est de $195 \text{ m}^3/\text{ha}$ et donc de 113 m^3 pour 5800 m^2 . Le volume total est ainsi connu : $V = 3263 \text{ m}^3 \pm 113 \text{ m}^3$ avec un risque de 5% de dépasser cette incertitude. En utilisant l'abaque sur les volumes à curer (Figure 6b), l'incertitude est de $82 \text{ m}^3/\text{ha}$ soit 48 m^3 pour notre bassin de 5800 m^2 , avec un risque de 5%. Une fois le volume à curer (noté VC) estimé d'après les côtes et les altitudes de surface, il est ainsi possible d'utiliser la valeur $VC + 48 \text{ m}^3$ pour réduire les risques de sous-estimation à 5%.

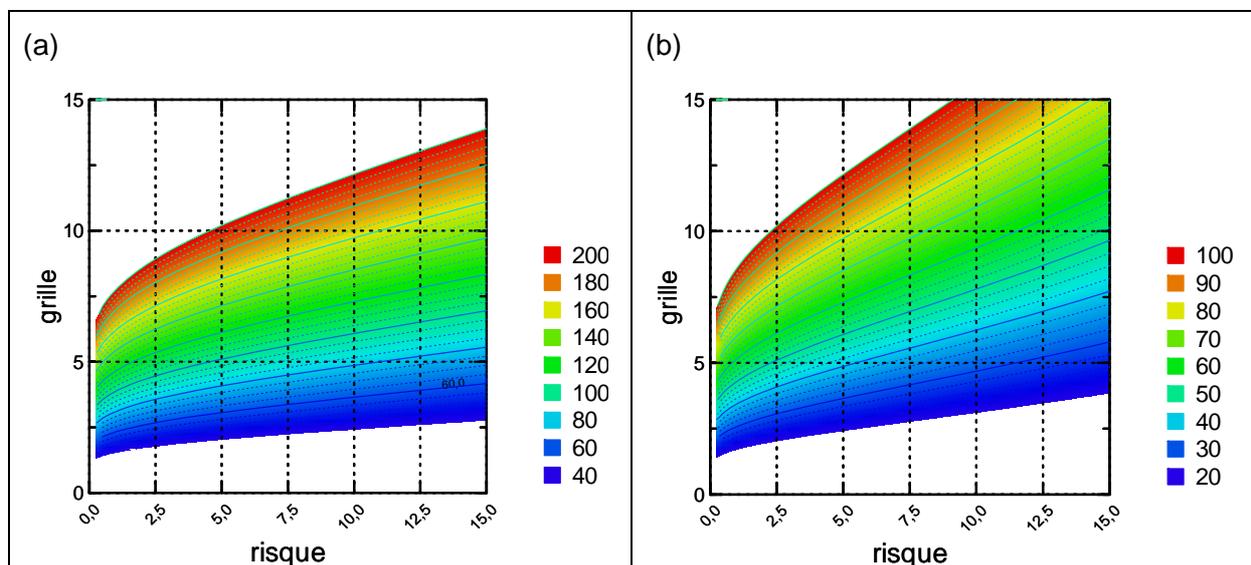


Figure 6 Abaqués pour la gestion des bassins de rétention d'eaux pluviales. (a) Incertitude sur le volume de sédiments existant (\pm incertitude en m^3/ha , grille en m, et risque bilatéral en %) pour un écart-type de 10 cm de la mesure d'épaisseur du sédiment ; (b) Tolérance sur le volume de sédiment à curer (tolérance en m^3/ha , grille en m, et risque de dépasser la tolérance en %) pour un écart-type de 5 cm de la mesure d'altitude du sédiment.

Cet exemple vise à montrer directement qu'il est possible de choisir un nombre de points de mesure (maillage ou grille) minimum tout en maîtrisant les risques liés à la sous-estimation ou la surestimation du volume de sédiments à curer à partir des abaques réalisés. Le gestionnaire peut décider de l'erreur qu'il tolère sur les mesures des volumes et du risque maximum admissible de dépasser la tolérance. Par conséquent cette méthode permet non seulement de prévoir le volume de sédiments existants mais aussi de connaître la marge d'erreur de la prévision et la quantité de sédiments à curer, et ainsi de prévoir le nombre de véhicules et le volume de stockage à assurer lors du curage.

4 CONCLUSION

Cette étude réalisée sur un bassin de rétention des eaux pluviales de l'agglomération de Limoges a permis de développer une méthode de mesure directe de la quantité de sédiments présents dans ce bassin et du volume à curer lors des phases d'entretien. La méthode mathématique du traitement des données est basée sur une approche géostatistique par variographie développée et appliquée à cette approche.

Cette méthode de mesure se veut rapide de mise en place, et surtout fiable en termes de

détermination de volume. Des abaques ont été créés en vue de son utilisation potentielle par les gestionnaires. Il est ainsi possible de déterminer la maille de mesure (nombre de points) tout en regardant un risque et une tolérance choisis par le gestionnaire lui-même. La mise en place du modèle mathématique permettra aux gestionnaires de mieux suivre l'état sédimentaire des bassins dont ils ont la charge et d'éviter les débordements dus à la réduction du volume disponible pour les eaux de ruissellement. Ainsi le gestionnaire pourra hiérarchiser ses actions.

Bien évidemment, ce travail ne représente qu'un début, et nécessite d'être validé sur l'ensemble des différents types de bassins existant (morphologie, fond de forme, hydraulique, bassin sous eau...). Cette méthode est en cours de développement avec couplage de l'entrée des données externes ci-dessus. Il sera potentiellement possible de déterminer à terme la cinétique de sédimentation quel que soit le bassin et donc sa gestion dans le temps.

BIBLIOGRAPHIE

- Bates, D.M., and Watts, D.G. (2007). *Nonlinear Regression Analysis and its Applications*. Wiley & Sons, N.Y.
- Cressie, N.A.C. (1993). *Statistics for Spatial Data*. Wiley & Sons, N.Y.
- Dagnélie, P. (2007). *Théorie et Méthodes Statistiques*. Lavoisier, Paris.
- Simonoff, J.S. (1996). *Smoothing Methods in Statistics*. Springer, New York.
- Systat 12 (2007) Systat software Inc.