



# La Gestion Dynamique des déchets (GDD) : élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets

Gabriel Rojo, Mathias Glaus, Valérie Laforest, Robert Hausler, Jacques Bourgois

## ► To cite this version:

Gabriel Rojo, Mathias Glaus, Valérie Laforest, Robert Hausler, Jacques Bourgois. La Gestion Dynamique des déchets (GDD) : élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets. Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, Mar 2010, Alexandrie, Égypte. pp.247-255, 2010. <emse-00476982>

**HAL Id: emse-00476982**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00476982>**

Submitted on 21 Oct 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## **La Gestion Dynamique des déchets (GDD) : élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets**

ROJO Gabriel<sup>(1,2)</sup>, GLAUS Mathias<sup>(1)</sup>, LAFOREST Valérie<sup>(2)</sup>, HAULER Robert<sup>(1)</sup>, BOURGOIS Jacques<sup>(2)</sup>

Ecole de Technologie Supérieure (Station expérimentale des procédés pilotes en environnement - STEPPE) 1100 rue Notre Dame Ouest, Montréal (Québec), Canada, H3C 1K3

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (Centre : Sciences, Information et technologies pour l'Environnement – SITE), 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex2, France

### **Résumé**

En raison des impacts sociaux, économiques et environnementaux associés à la gestion des déchets, il est nécessaire de favoriser les prises de décision qui intègrent chacun de ces aspects. Actuellement, les approches préconisées sont plutôt statiques et linéaires dans leur application, elles ne permettent pas une utilisation optimale des matières disponibles. En conséquence, le choix des technologies pour la gestion des déchets repose souvent sur des paramètres fixes, alors que les systèmes sont en constante évolution. De plus, la validité de prioriser une technologie est directement liée aux impacts associés aux longueurs de trajets, aux modes de transports et aux caractéristiques des routes empruntées. Cependant, les outils disponibles négligent cet aspect dynamique qui est crucial pour réduire la charge des systèmes étudiés. Dans le but d'assurer une gestion durable et dynamique des déchets, la GDD propose une nouvelle approche évolutive permettant d'assurer une alimentation constante vers les technologies favorables dans un système. Pour y parvenir, la GDD repose sur la loi de la conservation de l'énergie qui permet d'équilibrer un réseau tout en considérant les contraintes associées aux transports. Afin de démontrer la portée de la GDD, cet article décrit l'approche, puis présente un exemple d'application.

Mots clés: écologie industrielle, gestion des déchets, outil d'aide à la décision, analyse de flux, modèle de simulation, approche dynamique, gestion intégrée, loi de la conservation de l'énergie.

### **Introduction**

Face aux problématiques associées à l'exploitation des ressources, le concept de gestion durable des déchets est désormais reconnu et entré dans les mœurs des principaux pays industrialisés. Même si des outils ont été développés pour appuyer la prise de décision, aucun ne combine les notions d'analyse systémique et de minimisation des impacts de façon globale et dynamique (Leao *et al.*, 2004; Woolridge *et al.*, 2005). La gestion des déchets doit aller au-delà de simples objectifs de réduction des volumes enfouis ou incinérés, elle doit viser l'acceptabilité sociale, la rentabilité économique et la compatibilité environnementale, tout en soutenant une évolution responsable et équitable de la société (Morrissey et Browne, 2004). En dépit des efforts déployés pour réduire les volumes de déchets éliminés, le manque d'investissements pour implanter des technologies de gestion adéquates (centre de tri, recyclage, valorisation, etc.) fait en sorte qu'une fraction considérable de matières récupérées finit souvent à l'enfouissement (Barton *et al.*, 2008). Afin de définir les besoins d'une société quant aux technologies à préconiser, les décideurs réclament de nouveaux outils qui leur permettront de prévoir les volumes de déchets qui seront disponibles, d'assurer l'alimentation constante et suffisante des installations, puis de déterminer l'emplacement le plus approprié des sites de traitement (Gautam et Kumar, 2005).

Cet article présente l'approche de la GDD qui combine les notions de distribution en réseaux et de conservation de l'énergie. En intégrant les caractéristiques intrinsèques associées aux transports lors de la prise de décision, la GDD permet de minimiser la charge infligée aux systèmes de gestion des déchets et d'assurer l'équilibre permettant l'alimentation constante des technologies en place. Afin de

démontrer le potentiel de la GDD, seront exposées dans un premier temps les bases de l'approche, puis un exemple d'application.

## 1. Introduction à la GDD

### 1.1 Principes de base

Dans un système de gestion des déchets, le réseau est influencé par divers paramètres. En plus de l'évolution des technologies et des transports, les quantités de déchets disponibles (générés ou en réserve) varient constamment. Ce type de réseau s'apparente à un réseau de distribution d'eau où des volumes d'eau sont admis dans le système, stockés, puis redistribués selon la demande. Concernant la distribution des flux dans un réseau d'eau, la loi de la conservation de l'énergie fait en sorte que l'écoulement se réalise vers les charges les plus faibles. Ainsi, plutôt que d'alimenter la demande de façon linéaire selon une hiérarchie établie, la distribution est dynamique et peut assurer une alimentation continue vers les endroits jugés prioritaires. La distribution des flux devient alors complémentaire plutôt que substitutive.

Pour des raisons d'acceptabilité, de rentabilité et de durabilité, la gestion des déchets doit suivre le modèle de la loi de la conservation de l'énergie qui permet une distribution des flux en fonction de la charge globale du système. Contrairement à l'approche de la hiérarchisation qui perd de sa validité lorsque des événements inattendus surviennent, la GDD permet un maintien optimal de la charge du système en tendant vers un régime permanent. En conséquence, malgré de fortes perturbations dans les volumes disponibles, il demeure possible d'alimenter les installations en fonction de leur effet sur la charge globale du système. Le Tableau 1 présente les analogies entre la GDD et les réseaux hydrauliques.

### 1.2 Influences associées aux transports

En se basant sur les bilans de masses, utilisés dans l'ACV, il a été démontré que les transports influencent significativement la validité de prioriser une technologie par rapport aux autres dans un système de gestion des déchets (Salhofer *et al.*, 2007). Comme dans un réseau de distribution d'eau, plus le trajet est long et plus il est contraignant, plus le transport demande de l'énergie et moins il est probable que la matière emprunte ce trajet. En considérant que la charge dans le système correspond aux impacts associés aux technologies et aux transports, la distribution des flux et l'équilibre du système dépendent directement des volumes disponibles et des caractéristiques du réseau.

Étant basée sur la loi de la conservation de l'énergie, la GDD permet d'étudier le comportement global des systèmes en considérant les impacts associés aux transports comme étant des pertes de charge linéaires. Ainsi, plus la perte de charge linéaire est élevée, moins il est probable que des déchets empruntent ces trajets dans le réseau.

Tableau 2 Analogies : réseau hydraulique Vs gestion des déchets, tirée de Rojo *et al.* (2008, p. 543)

Réseau de distribution d'eau	Système de gestion des déchets
Usine de traitement (Source)	Source de déchets générés
Réseau de distribution (Conduites)	Réseau de transport (Routes, train, etc.)
Réservoir	Stockage des matières (Réserves)
Charge hydraulique	Charge associée aux impacts
Demande en eau (Utilisation)	Alimentation des installations (Enfouissement, recyclage, valorisation, etc.)

### 1.3 Loi de la conservation de l'énergie

Comme mentionné précédemment, la GDD repose sur la loi de la conservation de l'énergie afin de favoriser l'alimentation vers les technologies dites favorables (à faible charge). Toutefois, cette distribution des flux est directement influencée par les impacts associés aux transports et tend vers une minimisation de la charge globale du système. En raison des analogies avec les **réseaux** de distribution d'eau, la GDD repose sur l'équation de conservation de l'énergie de Bernoulli (équation 1) qui permet de comparer le bilan hydraulique entre deux points (1 et 2) dans un réseau.

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \Delta H \quad (1)$$

Les paramètres de cette équation générale sont les suivants: la vitesse du fluide ( $v$  en  $m/s$ ), l'accélération gravitationnelle ( $g$  en  $m/s^2$ ), l'altitude ou la charge ( $h$  en  $m$ ), la pression dans la conduite ( $P$  en  $Pa$ ), la masse volumique ( $\rho$  en  $kg/m^3$ ), la perte de charge ( $\Delta H$  en  $m$ ).

## 2. Modèle général de la GDD

### 2.1 Prémisses de travail

En reprenant l'équation 1 et en considérant que les flux circulent dans des conduites circulaires entièrement remplies par le fluide, que la vitesse du fluide est constante ( $v_1=v_2$ ) et que le système est fermé, plein et qu'il ne subit aucune pression externe ( $P_1=0$ ,  $P_2=0$ ). Les énergies de pression et cinétique demeurent donc constantes d'un point à l'autre du réseau. Dans ce cas, la perte de charge entre deux points peut s'exprimer uniquement par l'énergie potentielle. Ainsi :

- Sachant que la vitesse est :

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2)$$

- Et que la perte de charge est :

$$\Delta H = \gamma \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 8\gamma \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{Q^2}{g \cdot \pi^2} \quad (3)$$

où les paramètres de la conduite sont représentés par : le coefficient de perte de charge ( $\gamma$ ), le débit ( $Q$  en  $m^3/s$ ), la section ( $S$  en  $m^2$ ), le diamètre ( $D$  en  $m$ ) et la longueur de la conduite ( $L$  en  $m$ ).

- Alors, l'équation 1 devient alors :

$$h_1 = h_2 + \Delta H = h_2 + \left( 8\gamma \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{Q^2}{g \cdot \pi^2} \right) \quad (4)$$

L'équation 4 indique que les flux d'un tel réseau sont dirigés vers les niveaux de charges les plus faibles, et que ces charges sont influencées par les pertes de charge associées aux débits et aux caractéristiques des conduites (longueur, diamètre, friction).

En gestion des déchets, comme les technologies préconisées engendrent des impacts qui leur sont propres et que le transport des matières exerce un impact additionnel, il s'avère intéressant d'étudier ces systèmes à l'aide des concepts de la mécanique des fluides. Par une telle approche, il devient ensuite possible d'étudier la dynamique des systèmes et d'évaluer les effets de chacun des paramètres sur la charge globale du réseau.

### 2.2 Les charges dans la GDD

Suivant la même logique qu'en hydraulique, les technologies disponibles dans un système de gestion des déchets doivent être alimentées en parallèle (en fonction de leur charge dans le réseau), et non pas en série (les uns à la suite des autres). Ce principe découle du fait qu'il est plus facile de maintenir un système à l'équilibre, de minimiser l'énergie nécessaire et d'admettre de fortes fluctuations dans un réseau maillé que dans un réseau en série (Ang et Jowitt, 2003). En plus d'optimiser l'utilisation des technologies disponibles, cette approche permet d'analyser l'impact de celles-ci sur l'ensemble du réseau. Pour étudier le comportement d'un réseau sur la base des énergies potentielles, l'équation 4 selon Bernoulli se décompose en trois segments distincts :

- La charge au point de départ ( $h_1$ )
- La charge au point d'arrivée ( $h_2$ )
- La perte de charge linéaire entre les 2 points ( $\Delta H$ )

Dans la GDD, la charge au point d'arrivée ( $h_2$ ) est remplacée par la charge associée à la technologie visée. Cette charge est appelée l'indice global d'attribution (IGA) et correspond au poids que

représente le recours à une technologie plutôt qu'à une autre. Par exemple, l'*IGA* pourrait représenter les impacts déterminés par l'*ACV*. Ce qui est important dans la GDD, c'est de comparer les technologies et les transports sous une base commune, puis en fonction des paramètres désirés.

Pour ce qui est de la charge au point de départ ( $h_1$ ), elle est représentée par l'indice de priorisation (*IP*) qui évoque l'importance que peut avoir un générateur de déchet dans le système. Ces générateurs peuvent être de source industrielle, municipale, etc. Cette charge de départ influence la distribution des flux dans le système lorsque celui-ci est saturé et permet de prioriser certains générateurs. Par exemple, lorsque certains déchets sont dangereux ou qu'ils ne peuvent pas être conservés chez le générateur, ils seront redirigés en priorité vers les technologies disponibles.

Tel que mentionné précédemment, la perte de charge linéaire ( $\Delta H$ ) correspond aux impacts associés aux transports dans la GDD et influence significativement la distribution des flux dans le système. Ces impacts sont appelés la perte d'indice associée aux transports ( $\Delta I_T$ ) et sont présentés plus en détail dans la section suivante.

### 2.3 Pertes de charge associées aux transports

Il est important de rappeler que le but de la GDD n'est pas de copier l'équation de Bernoulli pour l'appliquer à la gestion des déchets; il est plutôt de s'en inspirer afin de transposer la notion de perte de charge associée aux trajets parcourus. L'idée est de réaliser des simulations à l'aide d'une méthode itérative reconnue, comparable aux outils de calculs hydraulique, afin d'étudier les impacts associés aux technologies ainsi que ceux associés aux transports dans les systèmes de gestion des déchets.

En raison des impacts attribués au type de transport, à la longueur des trajets, aux volumes transportés ainsi qu'aux caractéristiques de la route, une attention particulière doit être portée lors de la définition de la perte de charge associée aux transports ( $\Delta I_T$ ). L'influence de  $\Delta I_T$  fait en sorte que malgré une valeur d'*IGA* favorable, les générateurs possèdent un rayon de transport au-delà duquel il n'est plus favorable d'envoyer les déchets vers certaines installations. En d'autres mots, même s'il est plus convenable de recycler un matériau plutôt que de l'enfouir, les distances à franchir font en sorte qu'il est parfois préférable d'enfouir un déchet que de le transporter sur de longues distances pour le recycler.

Comme la perte d'indice  $\Delta I_T$  correspond à une perte de charge linéaire dans la GDD, son équation (équation 5) s'inspire de l'équation de perte de charge dans l'équation de Bernoulli (équation 3). Ainsi, le coefficient de perte de charge ( $\gamma$ ), le débit ( $Q$ ), le diamètre ( $D$ ) et la longueur de la conduite ( $L$ ) de l'équation 3 sont remplacés respectivement par le coefficient de perte d'indice associé au trajet ( $\alpha$ ), le nombre de transports effectués ( $Q$ ), le facteur de caractérisation de la route ( $R$ ) et la longueur du transport ( $L$ ). Dans l'équation 5, les valeurs de  $\pi$  et de  $g$  ont été écartées car elles ne sont pas pertinentes. C'est plutôt le coefficient de perte de charge ( $\gamma$ ) qui équilibre l'équation.

$$\Delta I_T = \alpha \cdot \frac{L}{R^\beta} \cdot Q^\delta \quad (5)$$

Dans cette équation, qui est sans dimension, les variables  $\beta$  et  $\delta$  représentent respectivement les coefficients associés aux paramètres  $R$  et  $Q$ . Ces variables influencent la perte de charge (d'indice) relative au trajet et servent à pondérer les paramètres de l'équation de façon à ajuster l'influence du facteur de caractérisation et du débit dans l'équation 5.

Comme ils sont non significatifs dans l'équation de la GDD, la valeur de l'accélération gravitationnelle ainsi que les autres valeurs numériques ont été regroupées pour former le coefficient  $\alpha$ . Les unités associées aux paramètres de l'équation 5 dépendent de l'outil de comparaison préconisé par les utilisateurs pour définir les différentes charges et sont obtenues de façon empirique.

### 2.4 Équation générale de la GDD

Afin d'étudier le comportement de systèmes de gestion des déchets, l'équation générale de la GDD repose sur l'équation de la conservation de l'énergie (équation 4). La distribution des flux devient alors dépendante de l'indice attribué aux générateurs de déchets (*IP*), de l'indice des technologies disponibles (*IGA*), ainsi que des caractéristiques associées aux transports dans le réseau ( $\Delta I_T$ ). Cette

nouvelle équation générale de la GDD (équation 6) permet également d'étudier l'influence de chacun des paramètres sur l'ensemble d'un système.

$$IP = IGA + \Delta I_T = IGA + \left( \alpha \cdot \frac{L}{R^{\beta}} \cdot Q^{\delta} \right) \quad (6)$$

En raison de l'influence qu'ont les impacts associés aux transports sur la validité de prioriser une technologie de gestion des déchets, le choix des critères de comparaison et des outils demeure primordial dans l'application de la GDD. Les systèmes étudiés à l'aide de critères économiques ne proposeront sûrement pas les mêmes modèles de distribution des flux que s'ils avaient été étudiés selon des critères environnementaux ou sociaux. Il est donc recommandé d'opter pour des approches reconnues, tel que l'ACV, pour déterminer la charge qu'exercent les technologies disponibles et la charge occasionnée par les transports dans un système. Il s'agit ensuite de déterminer les influences qu'ont les volumes transportés, les moyens de transport utilisés et les routes empruntées sur  $\Delta I_T$ .

Une fois les paramètres de l'équation 6 définis, il est possible d'étudier le comportement des systèmes choisis. Comme avec l'équation de Bernoulli, il est également possible de mesurer l'état d'équilibre du réseau, de déterminer le modèle de distribution optimal des flux, de connaître les faiblesses du système, de prévoir la capacité maximale des réserves et des technologies disponibles ou prévues, etc. La réserve étant directement influencée par le comportement du réseau et étant libre de se remplir ou de se vider, la charge globale du système est représentée par la quantité disponible dans la réserve (l'indice de la réserve).

### Exemple d'application de la GDD

Dans le but de démontrer la portée de la GDD, la section suivante porte sur l'étude d'un scénario de gestion des déchets. Bien que le système proposé soit fictif à des fins de démonstration, ce dernier a été élaboré sur la base de conditions réelles. Pour réaliser les simulations, le logiciel d'analyse de réseaux hydraulique EPANET2 a été choisi. Cet outil permet d'analyser le comportement des réseaux et repose principalement sur la loi de la conservation de l'énergie (US-EPA, 2008). Parmi les approches mathématiques disponibles, l'équation de Hazen-William, qui découle du théorème de Bernoulli, a été retenue pour la GDD en raison de la simplification des écoulements dans le réseau.

### 2.5 Caractéristiques du système étudié

Le scénario retenu porte sur la gestion de déchets de bois dans une région d'environ 30 000 km<sup>2</sup>. Le système est composé de trois principaux générateurs de déchets qui ont le choix entre quatre technologies qui ont des capacités de traitement différentes ou une réserve qui a une capacité admissible maximale. Les transports sont faits par des camions dont la capacité est de 20 t par chargement. Les déchets générés sont :

- Des poteaux de services
- Des traverses de chemin de fer
- Des résidus de bois de construction

Une fois introduits dans le réseau, les déchets peuvent être envoyés vers :

- |    |                  |  |
|----|------------------|--|
| R. | Une réserve,     | Capacité max. : 10 000 t et 200 chargements/mois |
| A. | L'incinération,  | Capacité max. : 70 charg./mois                   |
| B. | Le recyclage,    | Capacité max. : 45 charg./mois                   |
| C. | Le compostage,   | Capacité max. : 65 charg./mois                   |
| D. | L'enfouissement, | Capacité max. : 50 000 t et 100 charg./mois      |

La carte géographique du système étudié ainsi que le schéma global, tel que modélisé dans EPANET2, sont présentés à la Figure 1. La figure expose également les caractéristiques des routes empruntées et les valeurs d' $IP$  et d' $IGA$  associées aux générateurs, à la réserve et aux technologies disponibles.

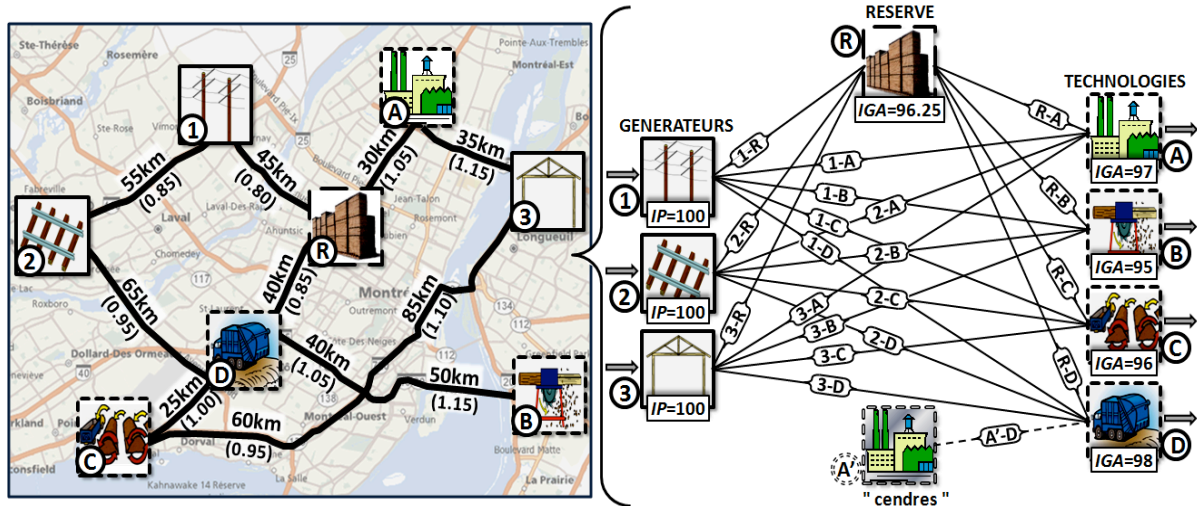


Figure 7 Carte du réseau à l'étude et schéma global modélisé dans EPANET2.

Les valeurs utilisées pour la simulation ont été attribuées de façon aléatoire, tout en respectant une distribution réaliste. Dans le scénario proposé, les générateurs possèdent le même  $IP$ , puis la réserve et les technologies possèdent des valeurs d' $IGA$  en fonction de leur charge dans le réseau. Plus l'indice est élevé, moins il est probable que des flux de déchets s'y dirigent, et plus l'indice est faible, plus il y aura de probabilité qu'il y ait une alimentation constante. En addition aux volumes de déchets générés, les cendres provenant de l'incinérateur sont redirigées vers l'enfouissement et engendrent une charge supplémentaire dans le réseau. Il a été fixé que 10% de la masse incinérée se retrouve sous forme de cendres.

En ce qui concerne les valeurs entre parenthèses sur la carte géographique, elles représentent les facteurs  $R$ . Ce facteur de caractérisation de la route peut être influencé par la densité du trafic, la largeur et le nombre de voies, puis par le type de route emprunté. Pour l'exemple suivant, les valeurs de  $R$  ont été basées sur le *Roadway Congestion Index (RCI)* développé par le *Federal Highway Administration* au Texas (Schrank et Lomax, 1996). Dans une ville comme Détroit où le niveau de congestion est élevé, le  $RCI$  mesuré est de 1,24, alors que dans une ville comme Buffalo où le niveau de congestion est faible, le  $RCI$  est de 0,73 (Schrank et Lomax, 2007). Étant donné que  $R$  est représenté par le diamètre de la canalisation dans l'équation de Hazen-William et que la perte de charge est inversement proportionnelle à la taille d'une conduite,  $R$  devient l'inverse du  $RCI$  (équation 7).

$$R = \frac{1}{RCI} \quad (1)$$

Durant les simulations, deux types de camions sont utilisés. Les déchets provenant des générateurs 1 et 2 sont transportés par des camions type X et les déchets provenant du générateur 3 sont transportés par des camions type Y qui exercent une perte d'indice 50% plus élevés.

## 2.6 Simulation dans EPANET2

En raison des distinctions entre un système de gestion des déchets et un réseau hydraulique, la simulation dans EPANET2 nécessite des ajustements. Concernant le réseau, des vannes et des clapets de non-retour ont été utilisés pour définir les volumes admissibles (capacités maximales), puis pour éviter que les flux (les transports) circulent en boucles. Avec cette approche, les transports sont considérés de façon indépendante et la distribution des déchets peut se faire partout dans le réseau. Tel que démontré dans le schéma global de la Figure 1, les acteurs (générateurs, réserve et technologies) représentent les nœuds du réseau et sont inter reliés par les trajets qui les séparent.

Dans EPANET2, les valeurs d' $IP$  et d' $IGA$  attribuées aux acteurs sont converties en charges hydrauliques (en mètres). De plus, la réserve a été fixée de façon à s'assurer que plus son niveau est bas, plus son alimentation sera priorisée dans le système. Alors que plus son niveau est élevé, plus son indice exercera une pression pour favoriser son évacuation. L'indice à vide de la réserve a été fixé de façon à ce que, à distance égale, les technologies B et C soient priorisés, puis son indice à



plein pour que son évacuation soit assurée dans tout le système. Ainsi, la charge globale du système permettra de maintenir un niveau optimal dans la réserve.

En effectuant la conversion d'unité dans EPANET2, la valeur de  $\alpha$  calculée est de  $2,2 \times 10^{-6}$  pour un camion type X et de  $3,2 \times 10^{-6}$  pour un camion type Y. À l'aide de ces valeurs, de l'équation de la perte d'indice  $\Delta I_T$  obtenu par calculs (équation 8) et des données de référence (Tableau 2), le scénario peut être modélisé dans EPANET2 et les simulations peuvent être réalisées.

$$\Delta I_T = \alpha \cdot \frac{L}{R^{0,6538}} \cdot Q^{0,0704} \quad (2)$$

### 3. Résultats

Afin de démontrer le comportement de la GDD sous différentes contraintes, les flux intrants fixés pour les trois générateurs de déchets de bois suivent chacun une tendance particulière. Les déchets provenant du premier générateur sont aléatoires, ceux du second sont plutôt constants et ceux du troisième suivent une variation saisonnière. Pour démontrer le comportement du système dans les périodes de pointe, les volumes de déchets au 4<sup>e</sup> mois sont nettement plus élevés qu'à l'habitude, alors qu'aucun déchet n'est généré au 7<sup>e</sup> mois. Les volumes de déchets générés et la distribution des flux sont présentés plus en détail à la Figure 2. Dans cette figure, les volumes provenant des générateurs et de la réserve sont représentés par des couleurs distinctes. Les graphiques situés à droite présentent la distribution des flux suite aux simulations.

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs observations découlent de la simulation. En premier lieu, même si les flux proviennent de diverses sources, les technologies B et C sont alimentés avec constance tout au long de la simulation. De plus, les paramètres fixés pour la réserve font en sorte qu'un indice total inférieur à 97 (125 chargements) favorise son alimentation, et plus la réserve se remplit, plus il est probable que des flux se dirigent vers la technologie A et même vers D. Quant aux technologies B et C qui ont des indices favorables dans le système, leur alimentation est constante tout au long de la simulation grâce à la réserve qui complète lorsqu'il n'y a pas suffisamment de déchets générés (ex. : 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> mois). En fonction des indices d'attribution, qui sont influencés par les transports, il arrive que certains flux soient plus continus que d'autres. Par exemple, les flux provenant du générateur 2 qui sont dirigés vers le compostage (technologie C) sont relativement constant en raison de la courte distance qui les sépare et le faible IGA.

Bien que les cendres produites à l'incinération (technologie A) soient redirigées vers l'enfouissement (technologie D), l'indice élevé de cette dernière et la présence d'une réserve dans le système font en sorte que son alimentation est minimisée. Ce qui signifie que dans la réalité, et en fonction des paramètres adoptés au départ, cette distribution des flux permettrait une minimisation des impacts.

### 4. Discussion et conclusion

La GDD s'avère être une approche prometteuse quant à la gestion des déchets. En plus de faciliter l'alimentation constante des technologies dites favorables dans un système, la GDD assure une minimisation de la charge globale du réseau (indice de la réserve). Étant basée sur la loi de la conservation de l'énergie, particulièrement sur le théorème de Bernoulli, l'approche permet d'étudier le comportement général d'un système ainsi que l'influence de chacun des acteurs et des transports. Plutôt que de reposer sur une hiérarchisation linéaire des technologies disponibles, la GDD propose une prise de décision dynamique basée sur l'analyse systémique du réseau. Ainsi, en dépit des fluctuations dans les déchets générés, l'approche facilite le maintien à l'équilibre d'un réseau et l'utilisation optimale des réserves. Les résultats obtenus lors des simulations démontrent également que plus la charge globale du système est élevée, plus il est favorable de diriger les flux vers les technologies dont l'IGA est élevée. En plus d'assurer le maintien des activités de ces technologies, cette démarche permet d'assurer l'équilibre du système et de renouveler les stocks dans la réserve.

En fonction de la charge globale du réseau, de la capacité de la réserve et de l'alimentation des technologies, la GDD permet de juger si certaines réserves ou technologies du système sont inutiles, si de nouvelles seraient nécessaires et même de déterminer la capacité optimale de celles-ci. En addition, comme la GDD peut être combinée à une modélisation géographique des systèmes, il serait

même possible d'utiliser cette approche afin d'optimiser le positionnement des nouvelles installations de façon à minimiser davantage la charge globale et de maximiser l'alimentation des technologies dites favorables.

Devant la nécessité de réduire l'exploitation des richesses naturelles et de contrer la croissance marquée des déchets générés dans les pays industrialisés, de nouveaux outils doivent être développés afin d'assister les acteurs concernés dans leurs prises de décision. L'atteinte d'une gestion durable et responsable des déchets repose donc sur la capacité de minimiser le recours vers les technologies qui augmentent la charge globale du réseau. En ce sens, la GDD offre une approche novatrice, simple, flexible et évolutive qui soutient l'atteinte de ces objectifs.

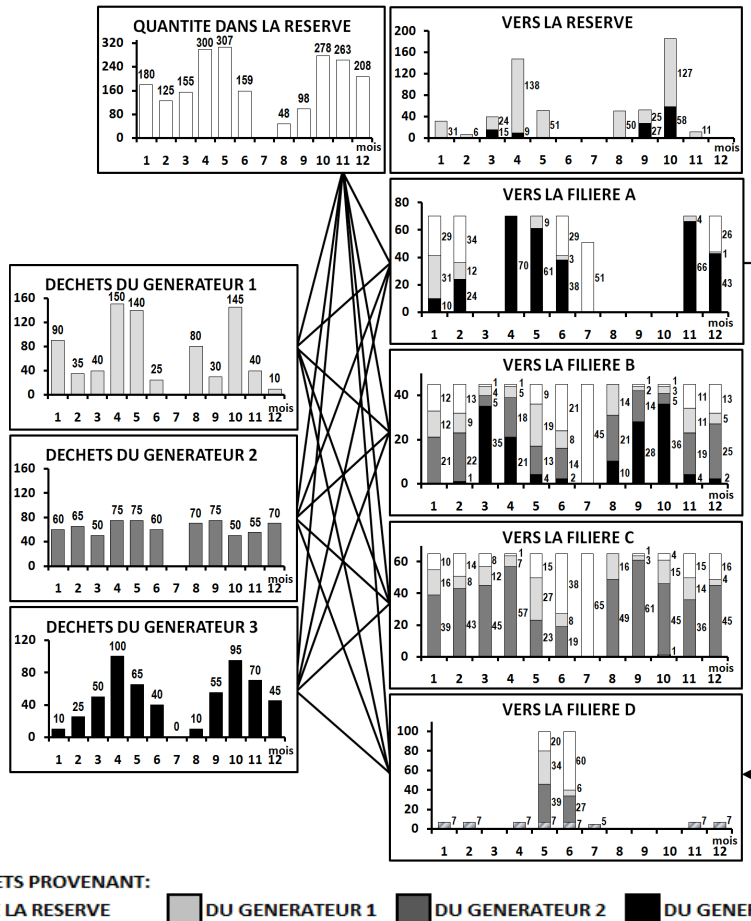


Figure 8 Distribution des flux dans le réseau (en nombre de chargements/mois).

**Références**

Ang, W. K. et P. W. Jowitt. 2003. « Some observations on energy loss and network entropy in water distribution networks ». *Engineering Optimization*, vol. 35, no 4, p. 375-389.

Barton, J. R., I. Issaias et E. I. Stentiford. 2008. « Carbon - Making the right choice for waste management in developing countries ». *Waste Management*, vol. 28, n° 4, p. 690-698.

Bovea, M. D., J. C. Powell, A. Gallardo et S. F. Capuz-Rizo. 2007. « The role played by environmental factors in the integration of a transfer station in a municipal solid waste management system ». *Waste Management*, vol. 27, n° 4, p. 545-553.

Gautam, A. K. et S. Kumar. 2005. « Strategic planning of recycling options by multi-objective programming in a GIS environment ». *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 7, n° 4, p. 306-16.

Leao, S., I. Bishop et D. Evans. 2004. « Spatial-temporal model for demand and allocation of waste landfills in growing urban regions ». *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 28, n° 4, p. 353-385.

Morrissey, A. J., et J. Browne. 2004. « Waste management models and their application to sustainable waste management ». *Waste Management*, vol. 24, n° 3, p. 297-308.

- Rojo, G., V. Laforest, M. Glaus, J. Bourgois et R. Hausler. 2008. « Dynamic Waste Management (DWM): A new step towards Industrial Ecology ». In (2-4 june). p. 541-550. Coll. « International Conference on Waste Management and the Environment IV ». University of Granada: The Wessex Institute of Technology.
- Salhofer, S., F. Schneider et G. Obersteiner. 2007. « The ecological relevance of transport in waste disposal systems in Western Europe ». *Waste Management*, vol. 27, n° 8, p. S47-S57.
- Schmidt, J. H., P. Holm, A. Merrild et P. Christensen. 2007. « Life cycle assessment of the waste hierarchy - A Danish case study on waste paper ». *Waste Management*, vol. 27, n° 11, p. 1519-1530.
- Schrank, D. L. et T. J. Lomax. 1996. *Urban Roadway Congestion 1982 to 1993*. Coll. «Research Report ». Texas, USA: Texas Transportation Institute 252 p.
- Schrank, D. L. et T. J. Lomax. 2007. *The 2007 urban mobility report*. Coll. « Research Report ». Texas, USA: Texas Transportation Institute 138 p.
- US-EPA. 2008. *EPANET2*, version. 2.00.12. Logiciel disponible en ligne. Environmental Protection Agency: Water Supply and Water Resources Division.
- <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>. Consulté le 20 avril 2009.
- Woolridge, A., A. Morrissey et P. S. Phillips. 2005. « The development of strategic and tactical tools, using systems analysis, for waste management in large complex organisations : A case study in UK healthcare waste ». *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 44, n° 2, p. 115-137.