

Contribution à une stratégie métropolitaine de réduction des macrodéchets par modélisation systémique : dynamiques, accumulations et évaluation d'actions sur la Métropole de Lyon

Contribution to a metropolitan strategy for reducing macro-waste through systemic modelling: dynamics, accumulation and evaluation of actions in the Lyon metropolitan area

Mathias Lasciouve¹, David Goutaland¹, Catherine Franck-Néel¹, Sylvain Moreira¹, Gaëlle Darmon², Charlotte Renouf³, Claudie Briand-Ponzetto³

Cerema¹ ; WAO Nature & Conservation² ; Métropole de Lyon³

mathias.lasciouve@cerema.fr, david.goutaland@cerema.fr, catherine.neel@cerema.fr, sylvain.moreira@cerema.fr, gaelle.darmon@ecomail.fr, crenouf@grandlyon.com, cbriandponzetto@grandlyon.com

RÉSUMÉ

La réduction des macrodéchets urbains constitue un enjeu majeur pour les collectivités, en particulier du fait de leur transfert vers les milieux aquatiques. Dans ce contexte, une approche systémique a été développée dans le cadre d'un projet de R&D mené par le Cerema, la Métropole de Lyon et WAO Nature & Conservation. La démarche repose sur la construction d'un modèle dynamique de type Forrester, élaboré à partir d'un modèle conceptuel, d'une analyse causale et de données issues d'ateliers avec les acteurs opérationnels. Le modèle simule la production, la dispersion et l'accumulation de six types de macrodéchets dans les compartiments urbains (surface, réseaux, exutoires) et permet de comparer différents scénarios de gestion. Les résultats montrent que, sans actions, certains déchets présentent une forte accumulation en surface (mégots, papiers) ou en souterrain (lingettes), et qu'une proportion non négligeable atteint directement la Saône. L'évaluation de plusieurs actions expérimentales met en évidence l'efficacité des dispositifs de surface et l'effet complémentaire des actions souterraines. La combinaison des deux permet la plus forte réduction des accumulations simulées. Le modèle qui pourra être alimenté et amélioré par l'acquisition de futures données (diagnostic, avis d'experts), constitue un outil opérationnel d'aide à la décision et ouvre la voie à une stratégie territoriale intégrée de réduction des macrodéchets.

ABSTRACT

Reducing urban macro-waste is a major challenge for local authorities, particularly due to its transfer to aquatic environments. In this context, a systemic approach has been developed as part of a research project led by Cerema, Métropole de Lyon and WAO Nature & Conservation. The approach is based on the construction of a Forrester-type dynamic model, developed from a conceptual model, causal analysis and data from workshops with operational stakeholders. The model simulates the production, dispersion and accumulation of six types of macro-waste in urban compartments (surface, networks, outlets) and allows different management scenarios to be compared. The results show that, without actions, certain types of waste accumulate heavily on the surface (cigarette butts, paper) or underground (wipes), and that a significant proportion ends up directly in the Saône river. The evaluation of several experimental actions highlights the effectiveness of surface measures and the complementary effect of underground actions. The combination of the two allows for the greatest reduction in simulated accumulations. The model, which can be fed and improved by the acquisition of future data (diagnostics, expert opinions), is an operational decision-making tool and paves the way for an integrated regional strategy to reduce macro-waste.

MOTS CLÉS

Flux de déchets, gestion intégrée, macrodéchets, milieux aquatiques, modélisation systémique

1 INTRODUCTION / CONTEXTE

Un projet de recherche et développement a été lancé en 2022 par le Cerema, WAO Nature & Conservation et la Métropole de Lyon afin de réduire les macrodéchets sauvages au sein du territoire métropolitain. Inscrit dans une démarche expérimentale innovante, ce projet mobilise une approche systémique dans l'objectif de concevoir une stratégie territoriale efficace et opérationnelle permettant de limiter les flux de macrodéchets transitant dans les milieux urbains et leur transfert vers les milieux aquatiques.

Les macrodéchets sauvages proviennent de sources multiples, se diffusent par différentes voies de transfert et résultent d'interactions entre pratiques humaines, organisation urbaine et facteurs environnementaux. La modélisation systémique représente un cadre adapté à l'analyse de la production, de la dispersion et de l'accumulation de ces macrodéchets. Héritée des travaux fondateurs de Forrester (1961) et prolongée notamment par Meadows (1972 ; 2008), De Rosnay (1975) ou Le Moigne (1990), elle permet de représenter un système sous forme de relations d'interdépendance, de boucles de rétroaction et de flux. Cette approche rejoint plus largement les perspectives de la complexité urbaine (Pumain, 2020) ou de l'économie circulaire, qui considèrent la ville comme un système ouvert traversé par des flux matériels.

La problématique centrale de ce travail consiste à déterminer comment une approche systémique peut contribuer à l'élaboration d'une stratégie territoriale de réduction des macrodéchets, en agissant à la fois sur leur production, leur dispersion et leur captation, afin de limiter leur transfert vers les milieux aquatiques.

2 METHODOLOGIE

La démarche de modélisation systémique repose sur trois étapes complémentaires : l'élaboration d'un modèle conceptuel, la construction d'un diagramme causal, puis la formalisation d'un modèle dynamique de type Forrester, en cohérence avec les approches de la dynamique des systèmes (Forrester, 1961 ; Sterman, 2000).

La première étape a consisté à structurer une représentation globale du système de production, de dispersion et d'accumulation des macrodéchets (Figure 1). Ce modèle conceptuel s'appuie sur les diagnostics de terrain et des ateliers multi-acteurs menés avec les services techniques de la Métropole, le Cerema et WAO Nature & Conservation. Ces ateliers ont permis d'identifier les principales composantes du système (sources de production, vecteurs de transfert, dispositifs de captation, zones d'accumulation) et de caractériser les voies de transfert de six types de déchets prioritaires. Cette démarche s'inscrit dans la logique de construction collective, où la modélisation sert autant à structurer un système qu'à créer une compréhension partagée entre experts (Le Moigne, 1990 ; De Rosnay, 1975).

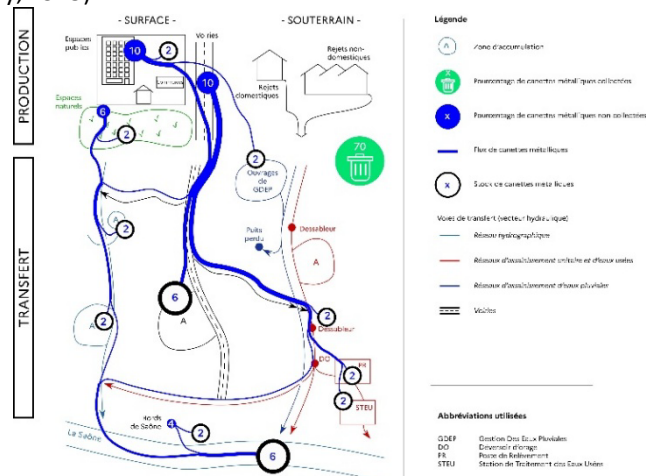


Figure 1 : modèle conceptuel simplifié du système de production et de transfert de macrodéchets. Exemple de simulation des stocks et flux de canettes

À partir du modèle conceptuel, les interactions ont été formalisées sous forme de diagrammes causaux, représentant les relations de cause à effet et les principales boucles de rétroaction du système. Cette représentation permet d'identifier les mécanismes dynamiques (accumulation, dispersion, etc.), ainsi que les leviers potentiels sur lesquels agir. Elle constitue une étape indispensable vers la modélisation dynamique.

La dernière étape a consisté à traduire l'analyse causale dans un diagramme de Forrester, structuré autour de stocks, flux et variables auxiliaires, permettant de simuler l'évolution temporelle du système. Les paramètres du modèle, développé sous Vensim PLE, sont alimentés par un tableau comprenant les flux internes au système pour les 6 types de déchets, structurant les transferts entre zones de production, de transfert et d'accumulation. Les valeurs initiales sont fixées sur la base des diagnostics de terrain. Les taux de transferts en surface et en souterrain ont été définis lors des ateliers multi-acteurs de la première étape (Moreira, S. *et al*, 2023).

Les données issues de plusieurs actions expérimentales ont été intégrées au modèle (e.g, filets en exutoire des DO, collectes par Brigades Nature, etc.). Le modèle permet ainsi de comparer différents scénarios de gestion, en évaluant leurs effets sur la collecte, l'accumulation et le transfert final des macrodéchets vers la Saône.

3 RESULTATS

3.1 Etat actuel du système (sans actions)

Les résultats du modèle, en configuration de référence (Tableau 1), permettent de décrire les macrodéchets sauvages présents au sein du système, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas été collectés en amont par les dispositifs classiques (poubelles, tri, collecte régulière). Les valeurs exprimées en pourcentage reflètent donc la répartition interne de ces déchets dans les différents compartiments urbains de manière normalisée.

Tableau 1 : répartition des macrodéchets sauvages dans le système en configuration de référence

		Canettes	Lingettes surface	Lingettes souterrain	Emballages	Frag papier	Mégot
Déchets produits entrant dans le système		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Surface	Espaces naturels	6.67	20.00	0.00	9.99	7.41	5.71
	Espaces publics (Commerces, habitats collectifs, ...)	6.67	30.00	0.00	20.00	18.52	30.00
	Voiries	20.00	0.00	0.00	13.34	18.52	15.71
	Réseaux hydrographiques	13.33	25.00	0.00	8.33	7.41	4.29
	Bords de Saône	6.67	0.00	0.00	6.67	3.70	4.29
	Total Surface	53.33	75.00	0.00	58.33	55.56	60.00
Déchets accumulés	Station de traitement des eaux usées (STEU)	6.67	0.00	35.00	3.33	3.70	10.00
	Postes de relèvement (PR)	6.67	5.00	15.00	3.33	3.70	0.00
	Canalisation ou réseau	13.33	15.00	35.00	16.67	29.63	12.14
	Total Souterrain	26.67	20.00	85.00	23.33	37.04	22.14
	Total accumulés	80.00	95.00	85.00	81.67	92.59	82.14
Déchets atteignant la Saône		20.00	5.00	15.00	18.33	7.41	17.86

Les résultats montrent que certains déchets présentent une forte tendance à s'accumuler en surface, et particulièrement dans les espaces naturels, espaces publics et voiries, notamment les mégots ($\approx 60\%$) ainsi que les emballages ($\approx 58\%$), les fragments de papier ($\approx 56\%$) et les canettes ($\approx 53\%$), reflétant leur dispersion rapide comme le confirment les observations de terrain. À l'inverse, les lingettes se retrouvent très majoritairement dans les réseaux ($\approx 85\%$), ce qui confirme leur forte tendance à migrer et à stagner dans les compartiments souterrains. Cependant, les lingettes ne sont pas les seules à s'accumuler en souterrain : les emballages et fragments de papier (resp. $\approx 23\%$ et 37%) représentent également une part non négligeable.

La part de déchets atteignant directement la Saône, indicateur majeur des fuites du système vers le milieu aquatique, varie fortement selon les typologies. Les canettes (20%), mégots (18%) et emballages (15%) présentent les taux les plus élevés, révélant une vulnérabilité particulière à leur transfert vers le milieu naturel.

Le Tableau 1 révèle que, en l'absence d'actions spécifiques, le système urbain laisse une proportion significative des macrodéchets sauvages s'accumuler dans les espaces publics ou les réseaux et transiter entre les compartiments pour finalement atteindre la Saône. Ces résultats mettent en évidence les points critiques du système (réseaux pour les lingettes, surface pour les mégots et papiers), et soulignent la nécessité d'une intervention ciblée et systémique pour réduire les flux vers le milieu aquatique.

3.2 Impact d'action de réduction des macrodéchets

La Figure 2 présente l'évolution de l'accumulation de canettes dans l'ensemble du système au cours du temps pour quatre configurations : un scénario de référence sans actions, un scénario intégrant des actions curatives en surface, un scénario comprenant des actions curatives en souterrain, et enfin une configuration combinant l'ensemble des actions curatives (surface et souterrain). Les résultats sont exprimés en valeurs normalisées (%) par rapport au scénario de référence.

Dans le scénario de référence, l'accumulation présente une croissance continue, illustrant la difficulté du système actuel à réduire spontanément la présence de canettes dans l'environnement. L'ajout d'actions en surface (ramassage périodique par Brigades Nature et filets, paniers, barreaudages sur avaloirs) permet de réduire significativement l'accumulation totale de canettes ($\approx -23\%$ par rapport au scénario de référence), avec un effet rapide dès les premiers jours. Les actions en souterrain (filet en exutoire des déversoirs d'orages et adaptation

des ouvrages d'assainissement) montrent également une diminution, mais avec une dynamique plus faible et plus progressive ($\approx - 3 \%$), reflétant une plus faible efficacité de captation des actions mises en place dans les réseaux et les ouvrages d'assainissement sur les canettes.

Le scénario combinant actions de surface et actions souterraines est le plus performant : il présente la plus forte réduction d'accumulation sur l'ensemble de la période simulée ($\approx - 25 \%$). Cette synergie confirme l'importance d'une stratégie intégrée agissant simultanément sur les compartiments de surface et souterrain.

Ces résultats montrent que la modélisation systémique permet d'identifier clairement les leviers les plus efficaces pour réduire l'accumulation de canettes dans le système urbain.

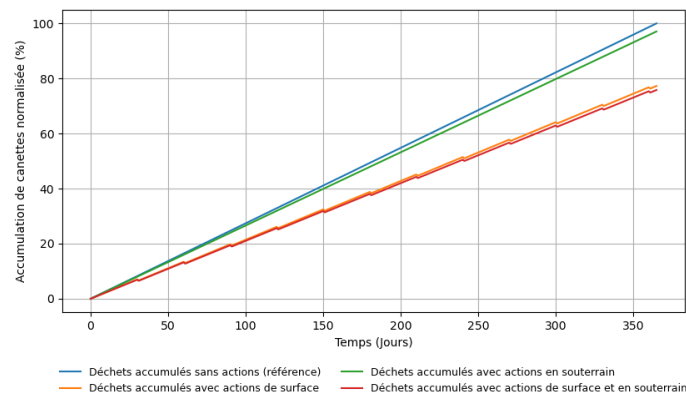


Figure 2 : évolution de l'accumulation de canettes selon différents scénarios d'action

4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus confirment l'intérêt d'une approche systémique pour analyser les dynamiques de macrodéchets au sein d'un territoire urbain complexe. Le modèle développé met en évidence la diversité des voies de transfert selon les types de déchets, et l'importance des zones d'accumulation (surface, souterrain) et des rejets vers le milieu aquatique. Les actions testées n'agissent pas toutes sur les mêmes leviers : les dispositifs de surface réduisent principalement l'accumulation dans l'espace public, tandis que les actions en souterrain limitent l'accumulation dans les canalisations. La combinaison de plusieurs actions apparaît ainsi comme la stratégie la plus efficace pour réduire le stock cumulé de macrodéchets.

Il convient toutefois de souligner plusieurs limites. D'une part, le modèle repose actuellement sur des données ne représentant pas des quantités absolues vérifiées, mais bien des ordres de grandeur et des rapports internes au système. Les résultats doivent donc être interprétés en termes relatifs plutôt qu'en volumes physiques. D'autre part, certaines dynamiques, notamment météorologiques ou comportementales, restent simplifiées, et la calibration du modèle devra être approfondie avec de nouvelles données d'observation.

Malgré ces limites, le modèle constitue un outil opérationnel pour comparer des scénarios de gestion et orienter les interventions territoriales. Il permet d'identifier les zones les plus vulnérables, de hiérarchiser les actions selon leur efficacité et d'appuyer la planification de stratégies intégrées de réduction des macrodéchets.

Les perspectives de développement sont multiples. Elles incluent l'intégration d'un plus grand nombre de types de déchets, l'ajout de nouvelles actions dont des actions préventives de sensibilisations, ou encore l'amélioration du module de production afin d'obtenir des quantités plus réalistes. Le modèle pourrait également être utilisé dans une logique d'aide à la décision, en lien avec des dispositifs de suivi in situ ou des expérimentations futures.

Ainsi, cette modélisation constitue une première étape vers la construction d'un outil territorial d'analyse prospective, permettant d'évaluer l'impact de politiques publiques de réduction des macrodéchets et de mieux comprendre les dynamiques qui relient l'espace urbain aux milieux aquatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- De Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie : vers une vision globale*. Paris, Éditions du Seuil.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Meadows, D. H. (1972). *The Limits to Growth*. New York: Universe Books.
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. White River Junction: Chelsea Green Publishing.
- Moreira, S. (2023) *Démarche de co-construction d'une stratégie de prévention et de gestion des macrodéchets dans les systèmes hydrauliques urbains : Application au contexte de la Métropole de Lyon*. Novatech 2023, Juillet, Lyon, France. fhal-04185041https://hal.science/hal-04185041/document.
- Pumain, D. (2020). *Theories and Models of Urbanization*. Springer.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill Education.