

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**SOLUTIONS D'IDENTIFICATION ET DE SEPARATION
DES BATTERIES ET CARTOUCHES DE GAZ
DANS LES FILIERES DE GESTION DES DECHETS**

***SOLUTIONS FOR THE IDENTIFICATION, SEPARATION
AND SORTING OF BATTERIES AND GAS CARTRIDGES
IN WASTE MANAGEMENT STREAMS***

Avril 2026

M. TONDENIER, V. SIVELLE, J. THIRIET, A. DEPROUW
In Extenso Innovation Croissance

In Extenso
INNOVATION CROISSANCE

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des structures spécialisées, publiques ou privées.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Solutions d'identification et de séparation des batteries et cartouches de gaz dans les filières de gestion des déchets, 2026, 165p, n°25-0181/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

RESUME

Améliorer le repérage à la source des éléments à risque dans les déchets pour faciliter leur séparation ultérieure est un des deux axes de travail relevé par l'IGEDD dans son rapport de septembre 2022 relatif à la Réduction de l'accidentologie dans le secteur de la gestion des déchets. À l'heure où les accidents en installation de gestion des déchets se multiplient, les batteries au lithium et les cartouches de protoxyde d'azote sont particulièrement pointées du doigt. Ces déchets ne sont en effet pas censés être présents dans les flux en mélange et relèvent, en principe, de filières de collecte et de traitement spécifiques. Après avoir synthétisé les éléments relatifs à l'accidentologie associée à ces erreurs de tri et les différentes situations rencontrées, l'étude met en évidence les solutions pour identifier et trier les batteries et cartouches de gaz dans les flux de déchets, en s'appuyant sur des retours d'expérience d'acteurs du terrain, de porteurs de solutions et d'experts pour en dresser une analyse critique.

MOTS CLES

Protoxyde d'azote (N₂O), cartouches de gaz, batteries lithium, accidentologie, explosions, incendies, filières de gestion des déchets, identification et séparation, solutions, technologies, vision optique, intelligence artificielle, imagerie par rayons X, détection automatisée, tri automatisé, capteurs, fusion de capteurs, robotique, éjection pneumatique

SUMMARY

Improving the identification of hazardous items at source within waste streams, in order to facilitate their subsequent separation, is one of the two key areas highlighted by IGEDD in its September 2022 report on reducing accident rates in the waste management sector. At a time when incidents in waste management facilities are increasing, lithium batteries and nitrous oxide cartridges are particularly under scrutiny. These items are not intended to be present in mixed waste streams and should, in principle, be handled through dedicated collection and treatment schemes. After synthesizing the elements related to accidentology associated with these sorting errors and the various situations encountered, the study identifies and analyses solutions for detecting and separating batteries and gas cartridges within waste streams. This analysis is based on feedback from field operators, solution providers and experts, and provides a critical assessment of the available approaches.

KEY WORDS

Nitrous oxide (N₂O), gas cartridges, lithium batteries, accidentology, explosions, fires, waste management systems, identification and separation, solutions, technologies, optical vision, artificial intelligence, X-ray imaging, automated detection, automated sorting, sensors, sensor fusion, robotics, pneumatic ejection

Contexte de l'étude

Les Depuis une quinzaine d'années, les **accidents dans les installations de gestion des déchets** connaissent une **augmentation significative**, comme en atteste le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI) dans son bilan 2024. Ce dernier démontre qu'en 2023, une hausse des accidents industriels en France a été observée dans le secteur des déchets qui comprenait ainsi 20 % des événements recensés dans la base de données ARIA.

L'analyse de ces événements sur des **installations aux activités variées** (centres de collecte, de tri, de recyclage, de traitement thermique ou de stockage) fait transparaître que ces derniers sont fréquemment associés à la présence, dans les flux de déchets, **d'objets dont l'orientation vers ces filières est inappropriée**. Parmi ces objets, les piles et accumulateurs (PA), notamment lithium, ainsi que les **cartouches de gaz** (bombonnes de gaz, cartouches de protoxyde d'azote ou d'hélium...) apparaissent comme des contributeurs majeurs à l'accroissement des phénomènes accidentels observés.

Les départs de feu et les explosions constituent des **risques majeurs**, tant pour la **sécurité** des opérateurs que pour **l'intégrité des installations et la protection de l'environnement**. Ils sont également à l'origine de conséquences économiques importantes pour les exploitants, en raison des dommages matériels engendrés, des interruptions d'exploitation, des coûts de remise en état, ainsi que des impacts sur les conditions d'assurabilité des installations, pouvant se traduire par une hausse des primes, des restrictions de garanties, voire des difficultés d'accès à l'assurance.

Dans ce contexte, la **réduction des risques d'incendie et d'explosion** dans les installations de gestion des déchets constitue un enjeu prioritaire. Elle suppose à la fois une **évolution du cadre réglementaire** et le développement de solutions opérationnelles permettant de limiter la présence de ces déchets dangereux dans les flux traités.

Les travaux récents menés dans le cadre d'études RECORD, notamment sur la gestion de la dangerosité des piles et batteries lithium lors de la collecte et du tri des déchets ménagers assimilés, mettent en évidence **l'intérêt de dispositifs techniques de caractérisation et de détection**. Ces dispositifs visent à identifier, en amont des opérations de traitement (tri manuel ou automatisé, broyage, compactage ou incinération), la présence d'objets accidentogènes afin de permettre leur retrait des flux.

Toutefois, **si des offres technologiques existent aujourd'hui pour détecter ces éléments** dans différents flux de déchets, **leur efficacité, leur maturité et leurs conditions de déploiement restent encore à consolider**. L'analyse des retours d'expérience apparaît dès lors essentielle pour évaluer leur capacité à répondre aux enjeux opérationnels rencontrés par les filières de gestion des déchets.

Objectif de l'étude et approche méthodologique

L'étude vise à analyser de manière critique les solutions existantes ou en développement permettant d'identifier et de séparer les objets accidentogènes que constituent les batteries et les cartouches de gaz dans les filières de gestion des déchets, dans une perspective de réduction des incidents sur les installations.

Context of this study

Over the past fifteen years, **accidents in waste management facilities have increased significantly**, as highlighted by the French Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollution (BARPI) in its 2024 report. The report shows that in 2023, an increase in industrial accidents was observed in France, with **the waste sector accounting for 20% of the events recorded** in the ARIA database.

The analysis of these events across facilities with a wide range of activities (collection, sorting, recycling, thermal treatment, or storage) indicates that incidents are frequently associated with the presence, within waste streams, of **items that are not suited to these treatment pathways**. Among these items, **batteries and accumulators (B&A)**, particularly lithium, as well as **gas cartridges** (gas cylinders, nitrous oxide or helium cartridges, etc.), appear to be major contributors to the increase in observed accident phenomena.

Fires and explosions represent major risks, both for the safety of operators and for the integrity of facilities and environmental protection. They also result in **significant economic consequences** for operators, due to material damage, operational downtime, restoration costs, as well as impacts on the insurability of facilities, which may lead to increased premiums, coverage restrictions, or even difficulties in obtaining insurance.

In this context, **reducing the risks of fire and explosion in waste management facilities is a priority**. This requires both **regulatory developments** and the deployment of **operational solutions** aimed at limiting the presence of these hazardous wastes in treated streams.

Recent work carried out within RECORD studies, particularly on managing the hazardous nature of lithium batteries during the collection and sorting of municipal and similar waste, highlights the value of **technical characterization and detection systems**. These systems aim to **identify, upstream of treatment operations** (manual or automated sorting, shredding, compaction, or incineration), the presence of hazardous items in order to enable their removal from waste streams.

However, although technological solutions are now available to detect these elements in various waste streams, their **effectiveness, maturity, and deployment conditions still need to be further consolidated**. Therefore, analysing feedback from real-world applications is essential to assess their ability to address the operational challenges faced by waste management systems.

Objectives of the study and methodological approach

The study aims to **critically analyse existing and emerging solutions for identifying and separating hazardous items, namely batteries and gas cartridges**, within waste management systems, with a view to reducing incidents at treatment facilities.

It focuses in particular on two categories of items:

- batteries, especially **lithium-based ones** (button cells, lithium-ion batteries),
- single-use gas cartridges, with a particular focus on **nitrous oxide cartridges**.

Elle porte plus particulièrement sur deux catégories d'objets :

- les **batteries**, en particulier au lithium (piles boutons, batteries lithium-ion),
- les **cartouches de gaz à usage unique**, avec un focus sur les cartouches de protoxyde d'azote.

Ces deux typologies présentent des enjeux communs en matière de sécurité des installations, mais se distinguent par leurs modes de présence dans les flux et par le niveau de structuration de leur prise en charge. Les cartouches de protoxyde d'azote font notamment l'objet d'une attention particulière en raison de leur **diffusion rapide**, de leur **présence croissante dans les déchets collectés** et de leur contribution significative aux incidents liés aux contenants sous pression, en lien avec leur **petite taille, leur dispersion dans les flux et leurs usages hors cadre domestique**.

L'analyse repose sur une combinaison de travaux complémentaires visant à croiser les approches technologiques et opérationnelles. Elle s'appuie sur :

- une **analyse documentaire** des caractéristiques des objets et des risques associés dans les installations de traitement ;
- des **retours d'expérience d'acteurs de terrain** (exploitants, collectivités, organisations professionnelles), permettant de qualifier les conditions réelles d'occurrence des incidents ;
- un **benchmark de solutions technologiques**, analysées au regard de leur principe de fonctionnement, de leur niveau de maturité, de leurs conditions d'intégration et de leurs contraintes économiques.

Principaux résultats obtenus

Les travaux menés dans le cadre de l'étude mettent en évidence plusieurs constats.

➤ **Cartouches de protoxyde d'azote : un cadre réglementaire encore en développement**

Au-delà des enjeux de gestion des déchets, le développement rapide des usages détournés du protoxyde d'azote s'accompagne de problématiques sanitaires importantes, qui constituent aujourd'hui un moteur majeur de l'évolution du cadre réglementaire. Ce dernier apparaît ainsi en structuration progressive, à la croisée des enjeux de mise sur le marché, de gestion des déchets et de classification des substances dangereuses.

À ce jour, ces cartouches sont considérées comme des **emballages ménagers** et intégrées à la filière de responsabilité élargie du producteur (REP) correspondante, une classification qui ne reflète que partiellement les risques qu'elles génèrent. Des **obligations de reprise existent pour les distributeurs**, mais leur mise en œuvre reste limitée.

Sur le **plan des déchets**, la réglementation européenne prévoit leur classement comme déchets dangereux en présence de gaz résiduel. La **révision du règlement** « Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures » (**CLP**), applicable à partir de 2027, classera le protoxyde d'azote comme substance dangereuse, ce qui devrait conduire en pratique à la requalification des cartouches non vidées. Toutefois, cette évolution soulève des difficultés opérationnelles, liées notamment à la détection du gaz résiduel en conditions réelles.

Au **niveau national**, plusieurs évolutions sont en cours, visant à encadrer les usages (restriction ou pénalisation des usages récréatifs) et à faire évoluer leur gestion en fin de vie, notamment via un transfert vers la REP « Contenus et contenants des produits chimiques » (PCHIM).

*These two categories share common **safety challenges for waste management facilities** while **differing in terms of how they are present in waste streams** and the level of **structuring of their management systems**. **Nitrous oxide cartridges are given particular attention** due to their rapid proliferation, increasing presence in collected waste, and their significant contribution to incidents involving pressurized containers, linked to their small size, dispersion within waste streams, and uses outside of domestic contexts.*

The analysis is based on a combination of complementary workstreams aimed at integrating both technological and operational perspectives. It relies on:

- a literature review of the characteristics of the items and the associated risks in treatment facilities;
- feedback from field stakeholders (operators, local authorities, professional organizations), providing insight into the real conditions under which incidents occur;
- a benchmark of technological solutions, analysed in terms of their operating principles, maturity levels, integration conditions, and economic constraints.

Key findings

The work carried out as part of the study highlights several key findings.

➤ **Nitrous oxide cartridges: a regulatory framework still under development**

*Beyond waste management issues, the rapid development of misuse of nitrous oxide is associated with **significant public health concerns**, which are now a major driver of regulatory developments. The **regulatory framework is therefore progressively taking shape** at the intersection of market placement, waste management, and hazardous substance classification.*

To date, these cartridges are considered household packaging and are integrated into the corresponding regulatory developments (EPR) scheme, a classification that only partially reflects the risks they generate. Take-back obligations exist for distributors, but their implementation remains limited.

From a waste perspective, European regulations provide for their classification as hazardous waste when residual gas is present. The revision of the CLP Regulation, applicable from 2027, will classify nitrous oxide as a hazardous substance, which is expected in practice to lead to the reclassification of non-emptied cartridges. However, this evolution raises operational challenges, particularly related to detecting residual gas under real conditions.

At the national level, several regulatory developments are underway, aiming to better frame uses (restriction or penalisation of recreational uses) and to evolve end-of-life management, notably through a potential transfer to the EPR scheme for chemical products and containers (PCHIM).

At the European level, this classification could also lead to restrictions on market placement under the REACH Regulation, the implementation details of which remain to be defined.

In this context, the regulatory framework remains in transition. While it tends to better acknowledge the hazardous nature of these products, it does not yet fully

À l'échelle européenne, cette classification pourrait également conduire à des **restrictions de mise sur le marché dans le cadre du règlement REACH**, dont les modalités restent à préciser.

Dans ce contexte, le cadre réglementaire apparaît encore en transition. S'il tend à mieux reconnaître la dangerosité de ces produits, il ne permet pas encore de répondre pleinement aux enjeux opérationnels rencontrés par les acteurs de la gestion des déchets.

Batteries lithium et cartouches de protoxyde d'azote : une accidentologie significative à diverses étapes du traitement des déchets

Les retours d'expérience recueillis montrent que les incidents liés à la présence de batteries et de cartouches de protoxyde d'azote dans les flux de déchets sont aujourd'hui signalés dans un nombre croissant d'installations de gestion des déchets. Les centres de tri et les unités de valorisation énergétique sont particulièrement exposés, en raison de la nature des opérations mécaniques et thermiques qui y sont réalisées.

Dans les **centres de tri**, les incidents surviennent le plus souvent lorsque ces objets sont endommagés lors des différentes étapes de manipulation et de traitement des déchets. **Dans le cas des batteries**, ces contraintes mécaniques peuvent provoquer des **courts-circuits internes** susceptibles de générer des départs de feu sur les lignes de tri.

Dans les **unités de valorisation énergétique**, les cartouches de protoxyde d'azote peuvent être à l'origine d'incidents lorsqu'elles pénètrent dans les fours d'incinération. Soumises à des **températures élevées**, ces cartouches peuvent **exploser sous l'effet de la montée en pression du gaz** contenu dans le cylindre. Ces explosions peuvent provoquer des dommages matériels sur certains équipements et entraîner des interruptions d'exploitation.

Les exploitants signalent également des incidents lors des **opérations de manutention ou de stockage des déchets**, par exemple lorsque des cartouches ou des batteries sont présentes dans des bennes compactées ou des zones de stockage intermédiaires. Dans ces situations, les risques peuvent être amplifiés par des phénomènes de compression mécanique.

Au-delà des **risques immédiats pour la sécurité des installations et des opérateurs**, ces incidents génèrent des conséquences économiques significatives. Ces coûts sont aujourd'hui **majoritairement supportés par les acteurs situés en aval de la filière**, en particulier les exploitants d'installations de traitement et les collectivités, alors même que **l'origine des objets accidentogènes se situe en amont**, dans les phases de mise sur le marché et d'usage.

Dans ce contexte, **l'augmentation du nombre d'incidents signalés** témoigne d'un enjeu croissant pour la **sécurité et la continuité de fonctionnement des installations**, mais également d'une **répartition inégale des impacts et des coûts** entre les différents acteurs de la chaîne, au détriment notamment des exploitants et des collectivités.

➤ Une dispersion importante dans les flux de déchets

L'analyse des pratiques de mise au rebut met en évidence une **forte dispersion des objets accidentogènes dans les différents flux de déchets**, ce qui complexifie leur identification et leur gestion en amont des installations de traitement.

address the operational challenges faced by waste management stakeholders.

➤ **Lithium batteries and nitrous oxide cartridges: significant accident rates across multiple stages of waste treatment**

*Feedback collected shows that incidents related to the presence of batteries and nitrous oxide cartridges in waste streams are now reported in an increasing number of waste management facilities. **Sorting centres and waste-to-energy plants are particularly exposed** due to the mechanical and thermal processes involved.*

*In sorting centres, incidents most often occur **when these objects are damaged during handling and treatment processes**. In the case of batteries, mechanical stress can lead to internal short circuits likely to trigger fires on sorting lines.*

*In waste-to-energy plants, **nitrous oxide cartridges can cause incidents when entering incineration furnaces**. Subjected to **high temperatures**, these cartridges may explode due to pressure build-up of the gas within the cylinder. These explosions can cause equipment damage and operational downtime.*

*Operators also report incidents during **handling or storage operations**, for example when **cartridges or batteries are present in compacted containers** or intermediate storage areas. In such situations, risks may be amplified by mechanical compression phenomena.*

*Beyond immediate safety risks, these incidents generate **significant economic consequences**. These costs are currently largely **borne by downstream stakeholders**, particularly treatment facility operators and local authorities, even though the origin of hazardous items lies upstream, at the production and use stages.*

*In this context, the increase in reported incidents highlights a **growing challenge for both safety and operational continuity**, as well as an **uneven distribution of impacts and costs among stakeholders**, to the detriment of operators and local authorities.*

➤ **Significant dispersion within waste streams**

*The analysis of disposal practices reveals a **high level of dispersion of hazardous items across different waste streams**, which **complicates their identification and management upstream of treatment facilities**.*

Batteries, particularly lithium-based ones, are now embedded in many everyday products, often small and difficult to dismantle, such as button cells. This widespread use leads to their significant presence in waste streams, with many items incorrectly sorted and frequently ending up in residual waste or sorting streams. The diversity of formats and their potential concealment within waste make detection difficult during sorting operations, contributing to their recurrent presence in treatment facilities.

Nitrous oxide cartridges are characterised by strong dispersion in waste streams, linked to uses primarily occurring outside the home and the absence of clearly identified collection channels. They are frequently discarded in public spaces or disposed of with household waste. Their small size, high numbers, and similarity to other metallic objects make them difficult to detect during sorting

Les batteries, en particulier lithium, sont aujourd'hui intégrées dans de nombreux équipements du quotidien, souvent de petite taille et difficilement démontables, à l'image des piles boutons. Cette diffusion conduit à une présence importante dans les flux de déchets, avec des équipements souvent orientés vers les mauvaises filières, qui se retrouvent ainsi fréquemment dans les ordures ménagères ou les flux de tri. La diversité des formats et leur possible dissimulation dans les déchets compliquent leur détection lors des opérations de tri, contribuant à leur présence récurrente dans les installations de traitement.

Les cartouches de protoxyde d'azote se caractérisent par une forte dispersion dans les flux de déchets, liée à des usages majoritairement réalisés hors du domicile et à l'absence de circuits de collecte clairement identifiés. Elles sont fréquemment abandonnées dans l'espace public ou éliminées avec les ordures ménagères. Leur petite taille, leur présence en nombre et leur similitude avec d'autres objets métalliques rendent leur détection difficile lors des opérations de tri, ce qui explique leur présence récurrente dans les installations de traitement.

➤ **Une offre technologique en développement afin d'améliorer la détection des batteries et des cartouches de protoxyde d'azote présentes dans les flux de déchets**

Le benchmark réalisé a démontré qu'une grande partie des solutions repose sur des dispositifs d'analyse automatisée des flux, combinant des **systèmes de captation** (vision artificielle, imagerie par rayons X ou autres technologies) avec des **outils d'analyse algorithmique** permettant d'identifier certains objets ou signatures caractéristiques dans les déchets en circulation sur les lignes de tri. Ces systèmes s'appuient généralement sur des modèles d'apprentissage automatique ou sur des bases de données d'images pour reconnaître des objets à risque dans des flux hétérogènes.

En complément de ces approches, d'autres solutions s'inscrivent dans des **logiques plus mécaniques ou organisationnelles**. Certaines reposent sur des **dispositifs de tri spécifiques ou des aménagements de ligne visant à isoler certains flux à risque** (zones de pré-tri, ralentissement des flux, séparation par densité ou par taille). D'autres approches visent à limiter les risques sans nécessairement détecter précisément les objets, par exemple via des **dispositifs de sécurisation des équipements** (systèmes d'extinction précoce, confinement, adaptation des procédés) ou des protocoles opérationnels renforcés.

Dans la plupart des cas, **les technologies de détection sont conçues pour être intégrées aux installations existantes**, notamment au niveau des convoyeurs, afin d'identifier les objets potentiellement dangereux et de déclencher leur extraction automatique du flux. Les dispositifs d'éjection permettent ensuite d'orienter ces objets vers des circuits de traitement spécifiques ou des zones sécurisées.

Certaines solutions cherchent également à intervenir **plus en amont dans la chaîne de gestion des déchets**, par exemple lors des premières étapes de traitement mécanique ou, plus marginalement, lors des opérations de collecte.

Enfin, les performances de ces différentes approches restent **dépendantes des caractéristiques des flux de déchets**, qui demeurent hétérogènes et difficiles à analyser de manière systématique. La présence d'objets imbriqués, la variabilité des formes ou l'état des déchets peuvent notamment compliquer l'identification ou la gestion de certains objets accidentogènes.

operations, explaining their recurrent presence in treatment facilities.

➤ **A developing technological landscape to improve detection of batteries and nitrous oxide cartridges in waste streams**

The benchmark shows that a large share of solutions relies on automated waste stream analysis systems, combining detection technologies (computer vision, X-ray imaging, or other sensing technologies) with algorithmic tools to identify specific objects or characteristic signatures in waste streams. These systems generally rely on machine learning models or image databases to recognise hazardous items within heterogeneous flows.

In addition to these approaches, other solutions are based on more mechanical or organisational strategies. Some involve dedicated sorting systems or line modifications to isolate high-risk streams (pre-sorting zones, reduced throughput, separation by density or size). Others aim to mitigate risks without necessarily identifying objects precisely, for example through equipment protection systems (early fire suppression, containment, process adaptation) or enhanced operational protocols.

In most cases, detection technologies are designed to be integrated into existing facilities, particularly at conveyor level, to identify potentially hazardous objects and trigger their automatic removal from the waste stream. Ejection systems then allow these objects to be directed towards dedicated treatment routes or secured areas.

Some solutions also aim to intervene earlier in the waste management chain, for example during initial mechanical treatment stages or, more marginally, during collection operations.

Finally, the performance of these approaches remains dependent on the characteristics of waste streams, which are heterogeneous and difficult to analyse systematically. The presence of overlapping items, variability in shapes, and the condition of waste can complicate the identification and handling of certain hazardous objects.

Key learnings

➤ **A strong technological convergence**

The analysis of the identified solutions highlights a strong convergence of technological approaches, mostly based on the automated analysis of waste streams through imaging and data-processing technologies. These systems combine detection devices (optical systems, X-ray technologies, etc.) with analytical algorithms capable of identifying specific objects or characteristic signatures within heterogeneous waste streams.

This convergence reflects the maturity of the technological building blocks involved, which are already widely used in other automated sorting applications. Their adaptation to the detection of hazardous items therefore follows a logic of functional extension rather than the emergence of disruptive solutions. As a result, the proposed technologies rely on similar architectures, with differences mainly related to their integration or the optimisation of their performance.

Que nous apprennent ces résultats ?

➤ Une convergence technologique marquée

L'analyse des solutions identifiées met en évidence une **forte convergence des approches technologiques**, majoritairement fondées sur **l'analyse automatisée des flux de déchets via des technologies d'imagerie et de traitement de données**. Ces dispositifs combinent des systèmes de captation (optique, rayons X, etc.) et des algorithmes d'analyse permettant d'identifier certains objets ou signatures caractéristiques dans des flux hétérogènes.

Cette convergence traduit **la maturité des briques technologiques mobilisées**, déjà largement utilisées dans d'autres applications du tri automatisé. Leur adaptation à la détection d'objets accidentogènes s'inscrit ainsi dans une **logique d'extension fonctionnelle** plutôt que dans l'émergence de solutions de rupture. Les technologies proposées reposent dès lors sur des **architectures proches**, avec des **différences principalement liées à leur intégration ou à l'optimisation de leurs performances**.

Toutefois, cette homogénéité technologique **limite le potentiel de transformation du secteur**. En l'absence d'innovation de rupture, les solutions identifiées apparaissent davantage comme des **améliorations incrémentales des dispositifs existants** que comme des réponses structurelles aux enjeux d'accidentologie. Leur capacité à traiter des situations complexes, notamment en présence de déchets imbriqués ou dégradés, reste par ailleurs contrainte, ce qui limite leur efficacité dans des conditions réelles d'exploitation.

➤ Des contraintes d'intégration dans les installations existantes

L'intégration de ces technologies constitue un défi opérationnel important qui limite leur potentiel de déploiement. Les installations de gestion des déchets sont **conçues pour fonctionner à des cadences élevées**, avec des **chaînes de traitement optimisées**, rendant l'ajout de nouveaux équipements complexe.

L'implantation de **dispositifs de détection et d'éjection** nécessite souvent des **adaptations techniques significatives**, pouvant entraîner **des coûts supplémentaires et des perturbations d'exploitation**. Surtout, l'efficacité de ces technologies dépend fortement **des caractéristiques des flux** : la détection devient incertaine dès lors que les objets sont dissimulés, fragmentés ou mélangés, ce qui correspond précisément aux situations les plus fréquentes dans les installations.

Les contraintes industrielles (poussières, vibrations, vitesse des flux) imposent en outre de privilégier des **technologies robustes**, au détriment parfois de leur précision. Ces éléments traduisent un décalage entre les performances théoriques des solutions et leur efficacité réelle en conditions opérationnelles.

Plus largement, si certaines solutions cherchent à intervenir plus en amont, **la majorité des dispositifs identifiés restent toutefois positionnés sur les étapes de tri et de traitement**, c'est-à-dire à un stade où les déchets sont déjà mélangés, et de facto limite leur capacité à prévenir l'ensemble des situations à risque. Un tel positionnement **limite la résolution des causes structurelles du problème**, liées aux modes de consommation, aux pratiques de mise au rebut et à l'absence de tri à la source.

However, this technological homogeneity limits the sector's transformation potential. In the absence of breakthrough innovation, the identified solutions appear more as incremental improvements to existing systems than as structural responses to accident-related challenges. Their ability to handle complex situations, particularly where waste items are overlapping or degraded, also remains limited, reducing their effectiveness under real operating conditions.

➤ Integration constraints within existing facilities

The integration of these technologies represents a significant operational challenge that limits their deployment potential. Waste management facilities are designed to operate at high throughput rates, with highly optimised treatment lines, making the addition of new equipment complex.

The implementation of detection and ejection systems often requires significant technical adaptations, which may generate additional costs and operational disruptions. Above all, the effectiveness of these technologies strongly depends on the characteristics of the waste streams: detection becomes uncertain when objects are concealed, fragmented or mixed, which corresponds precisely to the most common situations encountered in facilities.

Industrial constraints (dust, vibrations, flow speed) also require the use of robust technologies, sometimes at the expense of precision. These factors highlight a gap between the theoretical performance of solutions and their actual effectiveness under operational conditions.

More broadly, although some solutions aim to intervene further upstream, the majority of identified systems remain positioned at the sorting and treatment stages, that is, at a point where waste has already been mixed. Such positioning limits the ability to address the structural causes of the problem, which are linked to consumption patterns, disposal practices and the lack of source separation.

➤ An uncertain economic model

The deployment of these technologies also faces significant economic constraints. The required investments include not only equipment acquisition, but also integration costs, infrastructure adaptation, maintenance and operator training.

In a sector often characterised by limited profit margins, such investments can be difficult to amortise, especially when the targeted objects represent only a minor fraction of the treated waste streams. The expected benefits, mainly linked to accident reduction, also remain difficult to quantify accurately, complicating operators' decision-making processes.

This situation leads to trade-offs between safety and economic viability and limits the large-scale deployment of the identified solutions. It also highlights an imbalance in cost distribution: downstream treatment facilities directly bear the consequences of incidents, even though their origin lies upstream, in product design, market placement and usage practices.

In this context, the question of financing these technologies more broadly raises the issue of the role of Extended Producer Responsibility (EPR) schemes and the ability of the regulatory framework to internalise the costs associated with the risks generated by these products.

➤ Un modèle économique incertain

Le déploiement de ces technologies se heurte également à des **contraintes économiques importantes**. Les investissements nécessaires incluent non seulement **l'acquisition des équipements**, mais aussi les **coûts d'intégration, d'adaptation des infrastructures, de maintenance et de formation des opérateurs**.

Dans un secteur caractérisé par des marges souvent limitées, ces investissements peuvent être **difficiles à amortir**, en particulier lorsque **les objets ciblés ne représentent qu'une fraction minoritaire des flux traités**. Les **gains attendus**, principalement liés à la réduction des incidents, restent par ailleurs **difficiles à quantifier** de manière précise, ce qui complique la prise de décision des exploitants.

Cette situation conduit à des **arbitrages entre sécurité et viabilité économique**, et limite le déploiement à grande échelle des solutions identifiées. Elle met également en évidence une **dissymétrie dans la répartition des coûts** : les installations de traitement, situées en aval, supportent directement les conséquences des incidents, alors même que leur origine se situe en amont, dans la conception, la mise sur le marché et les usages des produits.

Dans ce contexte, la question du financement de ces technologies renvoie plus largement **au rôle des dispositifs de responsabilité élargie du producteur** et à la **capacité du cadre réglementaire à internaliser les coûts** associés aux risques générés par ces objets.

➤ Des enjeux réglementaires déterminants

Au-delà du cadre existant, l'analyse met en évidence des conséquences structurelles importantes liées aux limites actuelles de la régulation. Concernant les **cartouches de protoxyde d'azote**, leur classement au sein de la **REP emballages** apparaît inadapté au regard des risques qu'elles génèrent. En pratique, ces coûts sont majoritairement supportés par les exploitants et les collectivités, traduisant un transfert de charges vers l'aval de la filière.

Par ailleurs, **la présence de nombreux acteurs de mise sur le marché difficilement identifiables ou localisés hors du territoire national** (pour les cartouches de protoxyde d'azote mais également les batteries), notamment via les plateformes de vente en ligne, favorise **des situations de « free riding »**. Ces acteurs échappent en pratique aux obligations de contribution aux filières de responsabilité élargie, **limitant la capacité de ces dernières à financer des dispositifs adaptés de collecte, de traitement ou de prévention**.

Ces **déséquilibres économiques et organisationnels réduisent les incitations à agir en amont du cycle de vie des produits** et contribuent à maintenir un **niveau élevé de risque dans les installations de traitement**. Ils **freinent également le déploiement de solutions techniques**, dont les coûts ne peuvent être absorbés par les seuls acteurs situés en aval. En outre, l'adoption à l'échelle européenne de la nouvelle classification du protoxyde d'azote comme substance toxique génère un certain attentisme des acteurs, **dans l'attente de précisions sur le contenu et les délais de mise en œuvre**.

Dans ce contexte, les évolutions réglementaires envisagées apparaissent nécessaires pour rééquilibrer la répartition des responsabilités et des coûts, sous réserve de leur capacité à intégrer l'ensemble des acteurs et à assurer leur mise en œuvre effective.

➤ Key regulatory challenges

Beyond the existing framework, the analysis highlights significant structural consequences linked to the current limitations of regulation. Regarding nitrous oxide cartridges, their classification within the packaging EPR scheme appears inappropriate considering the risks they generate. In practice, these costs are mainly borne by operators and local authorities, resulting in a transfer of burdens downstream along the value chain.

Furthermore, the presence of numerous market players that are difficult to identify or located outside the national territory (for nitrous oxide cartridges as well as batteries), particularly through online sales platforms, encourages "free-riding" situations. In practice, these actors evade their contribution obligations to Extended Producer Responsibility schemes, limiting the ability of such schemes to finance appropriate collection, treatment and prevention measures.

These economic and organisational imbalances reduce incentives to act upstream in the product life cycle and contribute to maintaining a high level of risk in treatment facilities. They also hinder the deployment of technical solutions, the costs of which cannot be absorbed solely by downstream stakeholders. In addition, the adoption at the European level of the new classification of nitrous oxide as a toxic substance is generating a degree of wait-and-see behaviour among stakeholders, pending clarification regarding implementation content and timelines.

In this context, the planned regulatory developments appear necessary to rebalance the distribution of responsibilities and costs, provided they are capable of encompassing all stakeholders and ensuring effective implementation.

Conclusions

*The study highlights an increase in incidents related to the presence of batteries and nitrous oxide cartridges in waste streams, with significant impacts on treatment facilities. In this context, the **technological solutions identified provide useful responses to improve the detection and separation of certain hazardous items**.*

*However, **their ability to fully address the identified challenges appears limited**, at least in the short term. Their effectiveness is highly dependent on **operational conditions and waste stream characteristics**, while their deployment remains **constrained by technical and economic factors**. Furthermore, these systems are most often implemented at a stage where waste is already mixed, which may limit their capacity to prevent all risk situations.*

*At the same time, **limitations in the regulatory and organisational framework** (particularly regarding the allocation of responsibilities, financing mechanisms, and the consideration of actors outside the formal scope) contribute to **maintaining a high level of risk upstream** of treatment facilities.*

*In this context, technological solutions appear as **relevant but insufficient levers**, which alone cannot fully address accident-related challenges. Their deployment would benefit from being part of a more **comprehensive approach**, combining **regulatory developments, greater accountability of stakeholders, and preventive actions** aimed at reducing the presence of such items in waste streams.*

Conclusions

L'étude met en évidence une augmentation des incidents liés à la présence de batteries et de cartouches de protoxyde d'azote dans les flux de déchets, avec des impacts significatifs pour les installations de traitement. Dans ce contexte, **les solutions technologiques identifiées apportent des réponses utiles pour améliorer la détection et la séparation de certains objets accidentogènes.**

Toutefois, **leur capacité à répondre pleinement aux enjeux identifiés apparaît limitée, au moins à court terme.** Leur efficacité dépend fortement des conditions opérationnelles et des caractéristiques des flux, tandis que leur déploiement reste contraint par des enjeux techniques et économiques. Par ailleurs, ces dispositifs interviennent le plus souvent à un stade où les déchets sont déjà mélangés, ce qui peut restreindre leur capacité à prévenir l'ensemble des situations à risque.

Simultanément, les **limites du cadre réglementaire et organisationnel**, notamment en matière de répartition des responsabilités, de financement et de prise en compte des acteurs hors périmètre, **contribuent à maintenir un niveau de risque élevé en amont des installations.**

Dans ce contexte, **les solutions technologiques apparaissent comme des leviers pertinents mais insuffisants, qui ne peuvent à elles seules répondre aux enjeux d'accidentologie.** Leur déploiement gagnera à s'inscrire dans une approche plus globale, combinant évolutions réglementaires, responsabilisation des acteurs et actions de prévention visant à limiter la présence de ces objets dans les flux de déchets