



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Produit T2.2.1

Modèle de réseau de transport optimisé entre les ports et les stations de traitement

Sommario

1. LE PROBLÈME DU RÉSEAU	4
1.1 Description du problème	4
1.2 Formalisation du problème mathématique	6
2. LE SCÉNARIO LOGISTIQUE ANALYSÉ	8
2.1 La demande du réseau maritime	9
2. Les données du problème du réseau	9
2.3 Les résultats du réseau optimisé	10
2.4 Calculer l'impact environnemental associé au réseau de transport optimisé	12

PRÉFACE

Ce document définit le modèle optimisé du réseau de transport maritime pour relier les ports d'IMPATTI_NO aux usines de traitement des déchets plastiques dans la zone transfrontalière.

Le scénario logistique analysé repose sur l'hypothèse d'une gestion de la collecte et du traitement des déchets entièrement par voie maritime. Le scénario logistique analysé prévoit l'installation à bord du navire d'une usine de gazéification assistée par plasma d'une capacité de 1500 tonnes par semaine. Les nœuds portuaires qui composent le réseau analysé sont Cagliari, Olbia, Bastia, Piombino, Livourne, La Spezia, Gênes, Savone et Toulon.

1. LE PROBLÈME DU RÉSEAU

Le scénario logistique envisagé concerne l'hypothèse de la gestion de la collecte des déchets plastiques portuaires et de leur traitement ultérieur entièrement par voie maritime. Ce scénario logistique prévoit l'installation à bord d'un navire d'une usine de gazéification assistée par plasma ayant une capacité de traitement hebdomadaire donnée. Le navire-usine ramasse les matières plastiques dans les ports qui composent le réseau de collecte et les traite directement à bord.

L'objectif du problème d'optimisation du scénario de collecte et de traitement des déchets par voie maritime est de déterminer le réseau le moins coûteux à desservir par le navire-usine en fonction des contraintes de demande et de capacité identifiées.

1.1 Description du problème

Dans le cadre de cette étude, le problème du développement d'un modèle optimisé pour la gestion logistique en mer des déchets issus des activités maritimes et portuaires au sein du réseau de ports Impact-No peut être formalisé comme suit:

- Le réseau de collecte est constitué d'un ensemble de nœuds (ports) à visiter.
- Chaque nœud (port) est caractérisé par un volume donné de déchets à traiter (m^3) qui doit être livré au navire-usine
- Tous les nœuds portuaires du réseau doivent être desservis par le navire au cours de la période de planification.
- À chaque nœud (port) atteint, le navire doit charger la totalité de la demande de déchets (m^3) pour ce nœud.
- Chaque nœud atteint a son propre coût opérationnel (€/h)
- L'ensemble du réseau est desservi par une seule installation-navire.
- Le coût de navigation (€/h navigué) se compose d'une partie fixe et d'une partie variable en fonction de la vitesse. Plus la vitesse est élevée, plus la part des coûts variables est importante.

- Le navire, initialement considéré comme vide, charge les déchets à traiter au premier nœud du voyage. Lorsqu'il arrive au deuxième nœud, le navire décharge la quantité de produit traité (le gaz de synthèse, qui ne découle pas nécessairement du traitement de tous les déchets à bord) et charge la nouvelle quantité de déchets à traiter, et ainsi de suite dans tous les autres nœuds du réseau.
- Pour que le navire arrivant au nœud suivant puisse charger la nouvelle quantité de déchets, il doit disposer d'une capacité résiduelle dans son réservoir de déchets au moins égale à la quantité de déchets à charger à ce nœud.
- Si un temps de traitement supplémentaire est nécessaire pour vider le réservoir de déchets du navire, afin de libérer la capacité résiduelle nécessaire pour accueillir le volume de déchets au nœud suivant, il est possible de simuler une période d'attente en rade en utilisant un nœud fictif situé à proximité du nœud réel et caractérisé par un coût horaire (€/h) égal uniquement à la part du coût fixe de navigation (le navire est immobile).
- Dans le réseau considéré, le nœud de départ coïncide avec le nœud d'arrivée final. Le navire termine son voyage aller-retour en retournant au port d'origine, après avoir traité tous les déchets produits par le réseau.
- Le réservoir à déchets du navire à la fin du voyage est vide ($m^3 = 0$)
- Le navire dispose d'un réservoir à déchets d'une capacité maximale donnée (m^3) et a une capacité de traitement horaire en termes de m^3 de déchets traités par heure (m^3/h)
- La vitesse à laquelle les déchets sont traités à bord du navire est constante, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas avec la vitesse du navire.
- On suppose qu'il n'y a pas de contraintes de capacité liées au stockage du produit de traitement des déchets à bord du navire (le navire peut contenir tout le produit sans problème d'espace jusqu'à l'arrivée au port suivant).
- On suppose que le navire utilisé est un navire alimenté de manière traditionnelle avec du HFO ou du MDO.

L'objectif du problème d'optimisation est de déterminer, compte tenu d'une vitesse de navigation fixe, le réseau le moins coûteux en respectant les contraintes de demande et de capacité identifiées.

Le résultat attendu concerne:

- La séquence optimale d'arrêts
- Le coût total du réseau, y compris les frais de déplacement et d'attente.

1.2 Formalisation du problème mathématique

Les éléments suivants sont définis :

- I : ensemble des ports
- $Q_{\max}$: capacité du navire
- ρ : taux de traitement
- c_s : coût de la navigation
- c_w : coût d'attente
- q : demande portuaire
- t : durée du voyage

Le problème d'optimisation mathématique peut être formulé comme suit:

$$\min \sum_i^I \sum_j^I c_s t_{ij} X_{ij} + c_w w_{ij}$$

$$\sum_j^I X_{ij} = \sum_j^I X_{ji} \quad (1)$$

$$\sum_j^I X_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$u_j \geq u_i + X_{ij} - I(1 - X_{ij}) \quad (3)$$

$$u_i \leq 1 \quad (4)$$

$$Q_j \geq Q_i + q_i - \rho(t_{ij} + w_{ij}) - Q_{MAX}(1 - X_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_j + q_j \leq Q_{MAX} \quad (6)$$

$$w_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (8)$$

La fonction objective est une fonction de moindre coût qui minimise le somme des coûts de déplacement et d'attente, et est soumise à un certain nombre de contraintes qui garantissent que chaque port n'est visité qu'une seule fois, que la demande est satisfaite, que les limites de capacité sont respectées et que les contraintes d'acheminement traditionnelles sont satisfaites.

2. LE SCÉNARIO LOGISTIQUE ANALYSÉ

Le scénario de gestion des déchets analysé prévoit l'installation d'une usine de gazéification assistée par plasma à bord du navire, d'une capacité de 1500 tonnes par semaine.

Les nœuds touchés par le navire-usine sont Cagliari, Olbia, Bastia, Piombino, Livourne, La Spezia, Gênes, Savone et Toulon (voir figure 1).

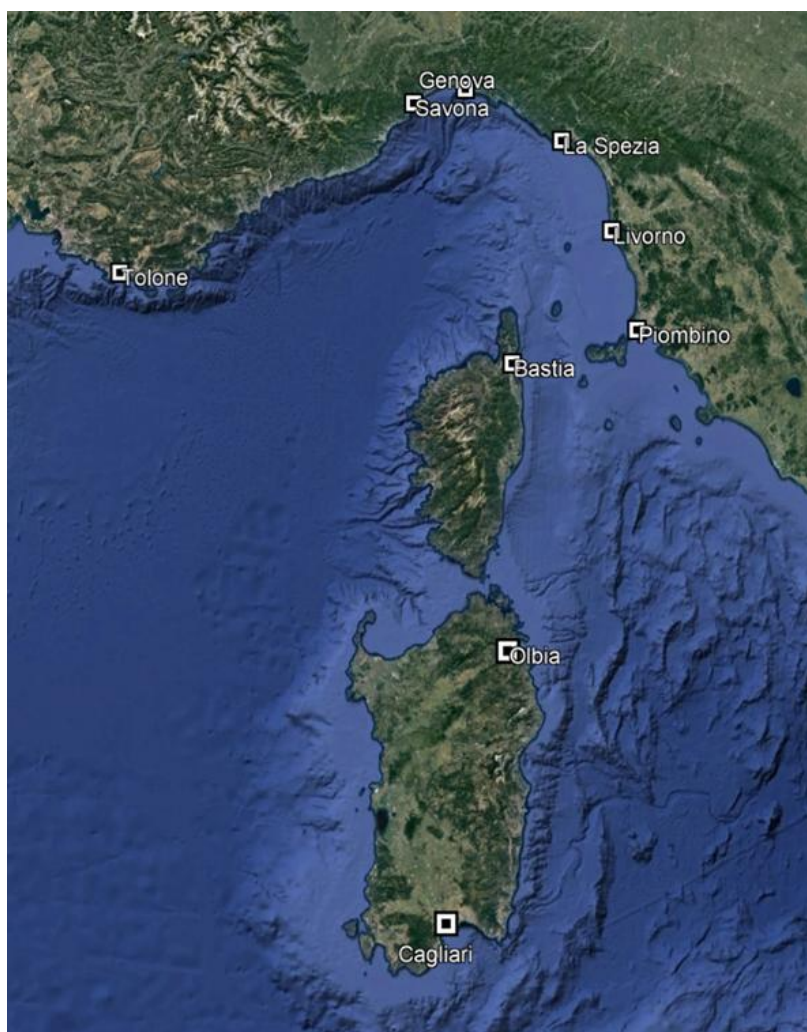


Figure 1. Les nœuds du réseau maritime

2.1 La demande du réseau maritime

Chaque nœud du réseau considéré est caractérisé par un volume donné de matière plastique qui doit être livré chaque semaine au navire de l'usine pour être traité. La quantité de matière plastique (t/semaine) que chaque nœud portuaire du réseau livre au navire de l'usine par semaine est indiquée dans le tableau 1. Le chiffre de la demande indiqué se réfère à la semaine de pointe et, pour chaque nœud, comprend les déchets plastiques provenant du port et des zones urbaines.

Tableau 1: Demande hebdomadaire.

Ports	Plastiques à traiter* (tonnes/semaine)**
Cagliari - città metropolitana	237,74
Olbia	72,81
Bastia	38,58
Piombino	28,50
Livorno	134,74
La Spezia	78,55
Genova	493,29
Savona	232,50
Tolone	142,41
Totale	1459,13

2. Les données du problème du réseau

Afin de définir le réseau de transport maritime optimisé en appliquant le modèle d'optimisation présenté ci-dessus, les paramètres d'approvisionnement suivants sont définis:

- Capacité de traitement de la station d'épuration: 1500 t/semaine
- Capacité du réservoir de plastique à bord: 500 t
- Vitesse de navigation: 11 kn
- Coût d'exploitation en mer: 17,6 €/nm

- Coût d'attente en rad : compte tenu du fait qu'en moyenne, entre 46 et 50% du coût opérationnel est représenté par les coûts de carburant, on suppose que le coût d'attente en rade vaut 50% du coût opérationnel en navigation.

2.3 Les résultats du réseau optimisé

L'application du modèle d'optimisation présenté au chapitre 1 au scénario logistique considéré peut être résumée comme suit:

- Le réseau est composé de 9 nœuds à visiter.
- Chaque nœud est caractérisé par un volume donné de déchets à traiter (tableau 1).
- Tous les nœuds portuaires du réseau doivent être desservis par le navire dans l'horizon de planification supposé d'une semaine.
- À chaque nœud visité, le navire doit charger la totalité de la demande de déchets pour ce nœud.
- L'ensemble du réseau est desservi par un seul navire de traitement des déchets.
- Le navire, initialement vide, charge la demande de déchets à traiter au premier nœud de départ du voyage aller-retour. Pour que le navire arrivant au nœud suivant puisse charger la nouvelle quantité de déchets, il doit disposer d'une capacité résiduelle dans son dépôt de déchets au moins égale à la quantité de déchets à charger à ce nœud. Si ce n'est pas le cas, il doit attendre dans la rade que la capacité de son magasin soit suffisante pour recevoir la nouvelle quantité de déchets plastiques.
- Le navire dispose d'un réservoir de déchets d'une capacité maximale de 500 tonnes et d'une capacité de traitement de 1500 tonnes/semaine.

Les résultats suivants sont dérivés:

- Séquence optimale de tours (voir figure 2) : Cagliari-Toulon-Savone-Gênes-La Spezia-Livourne-Piombino-Bastia-Olbia-Cagliari.
- Total des miles parcourus = 1 012 nm/semaine
- Temps de navigation par semaine : 46 h

- Temps d'attente en rade = 26 h
- Coût de la navigation = 17 811 €/semaine
- Temps d'attente en rade = 6 969,6 €/semaine
- Coût total du réseau (navigation + attente) = 24 780,6 €/semaine (hors frais de port)
- Coût annuel du transport = 1 288 600 €/an (hors coûts portuaires)

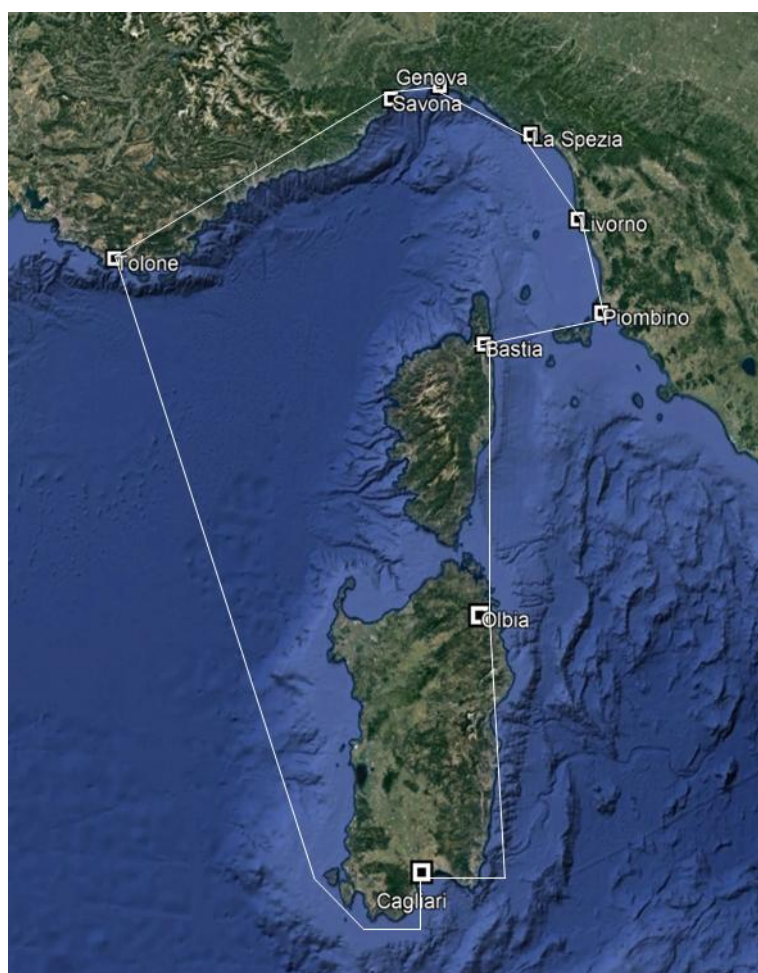


Figure 2: Le réseau maritime optimisé

L'itinéraire optimal de coût minimal, illustré à la figure 2, coïncide dans ce cas avec l'itinéraire de longueur minimale. Cela résulte du fait qu'il est plus rentable d'attendre dans la rade l'achèvement des opérations de traitement plastique nécessaires pour libérer une partie suffisante de la citerne afin de recevoir les déchets du prochain port touché par la route, plutôt que de modifier la séquence des ports en allongeant la route de sorte que le traitement ne soit effectué que pendant les heures de navigation. Ceci pour deux raisons principales: 1) le coût unitaire de l'attente en rade est bien inférieur au coût de la navigation (50%). 2) Certains ports très proches les uns des autres (Savone, Gênes, La Spezia) ont des exigences très élevées, nécessitant un temps d'élimination plusieurs fois supérieur au temps de navigation d'une escale à l'autre. En effet, le navire quittant Savone aurait besoin de 30 heures pour vider suffisamment la cuve afin de pouvoir accueillir la charge de déchets en provenance de Gênes. Étant donné que le temps de navigation entre Gênes et Savone est de 4 heures, la solution la plus pratique est d'attendre 26 heures jusqu'à l'arrivée à Gênes, plutôt que de modifier l'itinéraire pour inclure un si long tronçon de navigation. En effet, si nous décidions de visiter Olbia entre les étapes de Savone et de Gênes, cela impliquerait 44 heures de navigation, ce qui serait beaucoup trop long. Le navire ne serait alors opérationnel en traitement des déchets que sur une partie de ce trajet, ce qui entraînerait une augmentation totale du nombre d'heures d'exploitation (navigation + attente) nécessaires pour garantir le nombre d'heures de traitement des déchets requis pour répondre à la demande globale, et une augmentation conséquente des coûts totaux. Un problème similaire concerne la ligne Gênes-La Spezia, dont la durée est de 3 heures mais qui nécessiterait 49 heures pour éliminer la quantité de plastique nécessaire pour libérer de l'espace afin de répondre à la demande à La Spezia. Là encore, la solution optimale consiste à attendre 46 heures au mouillage à La Spezia plutôt que de modifier la séquence des visites.

2.4 Calculer l'impact environnemental associé au réseau de transport optimisé

Pour atteindre les niveaux ambitieux d'atténuation convenus au niveau international, l'industrie maritime et toutes les parties prenantes sont appelées à déployer des efforts substantiels pour

trouver et mettre en œuvre des solutions permettant de réduire l'impact environnemental du secteur. L'optimisation des réseaux de distribution peut contribuer à atténuer l'impact environnemental des activités maritimes. Le tableau 2 présente, pour le scénario de transport optimisé, une estimation des émissions de CO₂, NO_x et SO_x associées. Les estimations d'émissions sont basées sur la consommation de transport maritime (FC) et utilisent les facteurs d'émission (EF) pour l'année 2018 (kg de polluant/tonne de carburant) extraits de la quatrième étude de l'OMI sur les gaz à effet de serre (OMI, 2020) illustrée à la figure 3. Pour le calcul, une consommation moyenne de transport maritime (FC) de 0,354 t/h de carburant marin conventionnel est considérée.

Pollutants	Fuel Type	The Fourth IMO GHG Study						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂	HFO	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
	MDO	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206
	LNG	2,750	2,750	2,749	2,749	2,750	2,753	2,755
CH ₄	HFO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	MDO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	LNG	5.31	6.00	7.35	8.48	10.20	11.22	11.96
N ₂ O	HFO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
	MDO	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	LNG	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
NO _x	HFO	78.61	77.18	76.19	76.98	76.71	76.67	75.90
	MDO	53.12	52.51	52.14	57.68	57.45	57.62	56.71
	LNG	5.60	5.90	5.82	5.99	7.46	10.95	13.44
CO	HFO	2.84	2.83	2.84	2.86	2.86	2.87	2.88
	MDO	2.48	2.47	2.47	2.58	2.58	2.60	2.59
	LNG	1.88	2.07	2.38	2.64	3.10	3.57	3.97
NMVOC	HFO	3.14	3.13	3.13	3.17	3.18	3.19	3.20
	MDO	2.16	2.15	2.15	2.39	2.39	2.42	2.40
	LNG	0.81	0.88	0.99	1.09	1.26	1.44	1.59
SO _x	HFO	46.63	44.80	45.31	47.90	50.44	50.83	50.83
	MDO	2.74	2.54	2.35	1.56	1.56	1.56	1.37
	LNG	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PM	HFO	7.11	6.96	7.01	7.26	7.48	7.53	7.55
	MDO	0.97	0.96	0.94	0.92	0.92	0.92	0.90
	LNG	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
PM _{2.5}	HFO	6.54	6.41	6.45	6.68	6.88	6.93	6.94
	MDO	0.90	0.88	0.87	0.84	0.84	0.85	0.83
	LNG	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
BC	HFO	0.26	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26
	MDO	0.43	0.43	0.43	0.37	0.37	0.37	0.38
	LNG	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019

Figure 3. Emission factors (kg pollutant per tonne fuel). Fonte: Fourth IMO GHG Study (2020)

Tableau 3: Émissions annuelles (kg/an) associées au réseau de transport maritime optimisé.

Polluant	kg/an
CO ₂	5.273.671
NO _x	128.540
SO _x	86.082

Ces émissions peuvent être comparées à celles associées à des scénarios logistiques alternatifs basés sur la gestion terrestre des déchets afin d'évaluer leur durabilité environnementale en termes d'émissions de polluants atmosphériques.