

T3.5.1 Modèle de simulation de réseau de GNL

PARTENAIRES:

- **REGIONE SARDEGNA-Industria**
- **CHAMBRE de COMMERCE et d'INDUSTRIE du VAR**



Rapport d'activité T3.5

Définition du modèle de distribution du GNL et faisabilité

L'étude suivante a été développée dans le cadre du projet SIGNAL - Stratégies transfrontalières pour la valorisation du gaz naturel liquide, cofinancée par le programme INTERREG Maritime Italie-France 2014-2020.

À propos du document	
Code produit	T3.5.1
Titre du produit	Modèle de simulation de réseau de GNL
Code d'activité	T3.5
Titre de l'activité	Définition du modèle de distribution du GNL et faisabilité
Code du composant	T3
Titre du composant	Plan du réseau de distribution et de transport de GNL sur le territoire
Personne responsable de l'activité	Département de l'Industrie Sardaigne Région - CIREM Univ. De Cagliari -
Responsable scientifique de l'UNICA-CIREM pour le compte du ministère de l'Industrie	Professeur Paolo Fadda
Coordinateur de l'étude UNICA-CIREM pour le compte du ministère de l'Industrie	Ing. Federico Sollai
Personne responsable de la rédaction du document	REF-E SRL
Version	Final
Date	19/11/2020

Version	Date	Extender(s)	Description des changements
Final	19/11/2020	REF-E SRL	Examen des données



Ce travail est distribué sous licence Creative Commons Attribution - Partager de la même manière 4.0 International ([CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/))

Résumé

Indice des chiffres	4
Index de table	5
Abstrait	6
1. Configuration du réseau de distribution de GNL sur le territoire sarde	7
2. Aspects méthodologiques : calcul du coefficient de risque	21
3. Analyse des accidents sur le réseau routier de la Sardaigne	24
3.1. Généralités	24
3.2. Acquisition de données sur les accidents	24
3. Encodage des routes sur le graphique	27
3.4. Calcul du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par an	30
3.5. Calcul de la probabilité d'accident pour la Région de Sardaigne	33
4. Calcul de l'indicateur de dommages potentiels	36
4.1. Généralités	36
4.2. Personnes dans d'autres véhicules en transit	36
4. Population exposée autour de l'axe routier	37
4.4. Éléments de vulnérabilité environnementale	39
4.5. Calcul de l'indicateur de dommages potentiels et résumé des résultats	41
5. Identification des routes à moindre risque	44
5.1. Coefficient de risque global	44
5.2. Minimisation des risques et itinéraires routiers	46
5.3. Affectation des réseaux : cas d'une origine unique	47
5.4. Affectation au réseau : cas d'un plus grand nombre de lieux d'origine	54
6. Observations finales	56
7. Bibliographie et sitographie	58

Indice des chiffres

Figure 1. Ports d’atterrissage de GNL.....	8
Figure 2. Points réseau pour les utilisateurs fixes	11
Figure 3. Emplacement hypothétique des stations-service GNL - scénario théorique	14
Figure 4. Hypothèse de localisation des stations-service GNL - solution pratique	16
Figure 5. Emplacement hypothétique des stations-service GNL - scénario pratique modifié	18
Figure 6. Localisation des accidents sur une base municipale (2014-2018)	26
Figure 7. Répartition du kilométrage des camions	28
Figure 8. Estimation de la probabilité d'un accident	35
Figure 9. Identification de la population exposée	38
Figure 10. Identification des vulnérabilités environnementales.....	40
Figure 11. Carte des dommages potentiels liés aux arcs routiers	43
Figure 12. Carte du coefficient de risque associé au transit d'un camion-citerne cryogénique.....	45
Figure 13. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port d’Oristano ...	49
Figure 14. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Porto Torres	50
Figure 15. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port d’Olbia	51
Figure 16 Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Portovesme.	52
Figure 17. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Cagliari ...	53
Figure 18. Répartition des mouvements des pétroliers sur les routes à risque absolu minimum	55

Index de table

Tableau 1. Localisation des points d'origine par l'avancement de la procédure d'autorisation.....	7
Tableau 2. Emplacement des points de réseau par province et type	9
Tableau 3. Emplacement des points de réseau par province et type	10
Tableau 4. Localisation hypothétique des stations-service vendant du GNL automobile - scénario théorique.....	13
Tableau 5. Emplacement hypothétique des stations-service vendant du GNL automobile - solution pratique	15
Tableau 6. Emplacement hypothétique des stations-service avec vente de GNL automobile - scénario pratique modifié.....	17
Tableau 7. Points du réseau et demande annuelle de GNL - scénario de base	19
Tableau 8. Itinéraires par route nationale	29
Tableau 9. Concentration des flux sur le réseau routier national	30
Tableau 10. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - tous les sinistres	31
Tableau 11. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - accidents impliquant des camions ...	32
Tableau 12. Exposition au risque routier accidentel	41
Tableau 13. Itinéraires par route nationale	47

Abstrait

Ce document définit en détail le **modèle de distribution du GNL en Sardaigne**, en précisant les principales conditions de faisabilité technique.

Ce modèle est configuré comme un outil simplifié d'aide à la décision pour les Administrations et les Organismes Publics qui ont l'intention d'optimiser la distribution de GNL sur leur territoire, en partant d'hypothèses appropriées sur l'insertion de nouvelles usines ou installations de stockage de gaz sur le territoire même (en principe le long de la côte), et sur leur connexion stable avec les points de réseau individuels utilisés pour la distribution aux utilisateurs fixes ou mobiles, à travers l'utilisation de camions-citernes cryogéniques le long de routes prédéfinies.

De ce point de vue, le modèle consiste essentiellement en une application pour la modélisation des réseaux de trafic et pour la représentation territoriale à travers des cartes thématiques (dans un environnement GIS), qui par rapport aux origines et aux destinations du transport de GNL définit celles qui ont le moins d'impact sur la base des paramètres spécifiques identifiés dans T3.4.

Selon les spécifications du projet Signal, l'outil doit être utilisé par le planificateur de l'Administration Publique pour définir les interventions de requalification du réseau soumis à une plus grande charge véhiculaire des véhicules pour le transport de marchandises dangereuses, et pour définir les itinéraires obligatoires que les transporteurs doivent utiliser pour la distribution du GNL sur le territoire afin de limiter l'impact résultant d'éventuels accidents.

À cet égard, le développement du modèle nécessite la réalisation des activités décrites ci-dessous :

- identification détaillée du **réseau de distribution**, en localisant les **ports de déchargement** et les **points du réseau de distribution**, afin de définir la matrice d'incidence des relations O/D affectées par les mouvements des camions-citernes (*chapitre 2*)
- spécification du **coefficient de risque accidentel**, à utiliser comme **paramètre de coût social à minimiser** lors de l'identification des itinéraires (*chapitre 3*), obtenu comme produit de la **probabilité d'occurrence de chaque événement accidentel unique**, estimée par rapport aux statistiques de sécurité routière sur le réseau sarde (*chapitre 4*) et de la **gravité potentielle de l'événement lui-même**, évaluée par rapport à la fréquence et à la disposition de chaque arc du réseau (*chapitre 5*) ;
- détermination des itinéraires à risque minimal, obtenue en affectant la matrice d'incidence selon un algorithme permettant de trouver le coût social minimal attribué à la circulation des camions-citernes sur chaque arc de réseau individuel (*chapitre 6*).

1. Configuration du réseau de distribution de GNL sur le territoire sarde

Du point de vue de sa configuration spatiale, le réseau de distribution de GNL dans la Région de Sardaigne peut être décrit comme suit

- un ensemble de **lieux d'origine**, correspondant pour l'essentiel aux **ports de déchargement**;
- un ensemble de **lieux de destination**, correspondant aux **points** de vente ou d'utilisation finale du produit, qui, dans la pratique, peuvent remonter jusqu'à des **installations industrielles** individuelles, des **dépôts locaux** pour les utilisateurs civils/tertiaires ou des **stations-service** pour la vente de carburants de transport.

Il convient de souligner que, par leur nature même, le nombre de lieux d'origine est destiné à être structurellement inférieur au nombre de lieux de destination. Le résultat est une matrice d'incidence rectangulaire caractérisée par la prévalence du nombre de colonnes sur le nombre de lignes, à chacune desquelles peut correspondre un problème SOMD (*Single Origin to Multiple Destination*), tandis que la matrice entière elle-même fera référence à un problème MOMD (*Multiple Origin to Multiple Destination*) [Liu 2017].

PORTS DE DÉBARQUEMENT

Dans l'état actuel du développement des études relatives à l'utilisation possible du GNL en Sardaigne, le seul port caractérisé par des perspectives concrètes de mise en œuvre à court terme des infrastructures nécessaires au déchargement du GNL est celui **d'Oristano Santa Giusta**, où un premier dépôt est en cours de construction, un deuxième a terminé le processus d'autorisation et un troisième est en cours d'autorisation.

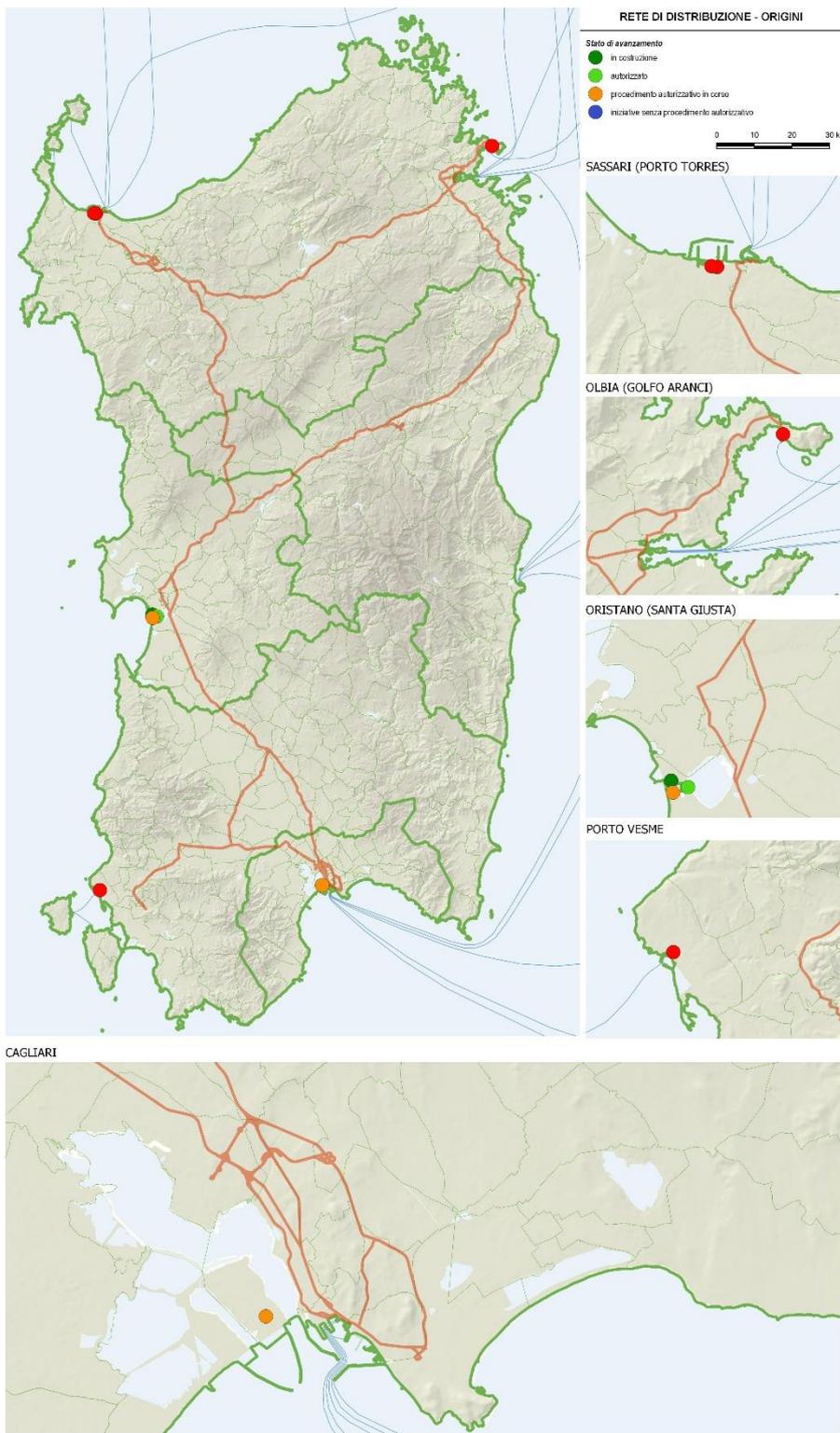
En perspective, les caractéristiques mêmes du système logistique de l'île permettent de supposer l'installation d'équipements similaires dans un nombre plutôt restreint d'autres ports d'escale, essentiellement imputables à **Porto Torres** (deux initiatives, qui n'ont pas encore entrepris la procédure d'autorisation), **Olbia/Golfo Aranci** (une initiative, sans procédure d'autorisation), **Cagliari** (une initiative en cours d'autorisation) et **Portovesme** (une initiative, sans procédure d'autorisation) (Tableau 1).

Stato della procedura autorizzativa	PUNTI DI ORIGINE					TOTALE
	Porto Torres	Olbia	Oristano	Porto Vesme	Cagliari	
in costruzione				1		1
procedura conclusa positivamente				1		1
procedura in corso			1		1	2
iniziativa senza procedura autorizzativa	2	1			1	4
TOTALE	2	1	3	1	1	8

Source : Traitement META sur les données REF-E

Tableau 1. Localisation des points d'origine par l'avancement de la procédure d'autorisation

Figure 1.



EtworkazionetMETA
 Figure 1. Ports d'atterrissage de GNL

POINTS DE RÉSEAU POUR LES UTILISATEURS FIXES

En ce qui concerne les points de grille, destinés aux utilisateurs industriels et/ou aux utilisateurs fixes civils ou tertiaires, cette étude acquiert leur position par rapport à la situation existante et/ou aux informations disponibles sur les utilisateurs potentiels de GNL.

En particulier, le scénario **d'utilisateurs industriels off-grid** équipés d'installations de stockage de GNL par satellite approvisionnées par des navires cryogéniques suppose que la demande totale du secteur industriel dans le scénario "de base" à l'horizon 2030 est égale à environ 20 kt/an de GNL répartis entre 20 utilisateurs, avec une consommation annuelle moyenne par utilisateur d'environ 1 000 t/an de GNL.

Le scénario de localisation de la consommation totale prévu dans le cas de base a été construit en utilisant les données sur la consommation industrielle fournies par la Région Sardaigne, en sélectionnant les secteurs d'activité pour lesquels, sur la base des informations disponibles, un passage de l'utilisation de produits pétroliers à l'utilisation de gaz naturel par le biais du GNL en aval est prévu d'ici 2030. L'utilisation des données fournies par la Région de Sardaigne a donc permis de construire un scénario réaliste concernant les secteurs spécifiques d'activité industrielle, la localisation et la consommation spécifique de chaque utilisateur considéré.

En ce qui concerne plutôt le scénario des réseaux de distribution isolés, on suppose que la demande totale pour le secteur civil dans le scénario "de base" jusqu'en 2030 est égale à environ 12 kt/an de GNL répartis entre 43 réseaux isolés, avec une consommation annuelle moyenne pour les dépôts satellites connexes d'environ 280 t/an de GNL.

Le scénario de localisation de la consommation globale prévue dans le cas de base pour le secteur civil en 2030 a été construit en utilisant les informations rendues publiques par le principal concessionnaire des réseaux de distribution en Sardaigne concernant les communes dans lesquelles le service de distribution de gaz naturel devrait être activé. La consommation attendue des réseaux isolés a été différenciée en deux classes de demande en fonction de la taille démographique/habitation des centres dans lesquels l'activation du service de distribution de gaz naturel est attendue.

L'utilisation des informations disponibles a donc permis de construire un scénario réaliste concernant la localisation et la consommation spécifique des réseaux de GNL isolés considérés.

Le résultat est un total de **63 points de réseau destinés aux utilisateurs fixes**, répartis principalement dans les provinces de Nuoro (22) et de Sassari (19), et dans une moindre mesure dans les provinces de Cagliari (9), d'Oristano (6) et de Sardaigne Sud (7) (Tableau 2).

PUNTI RETE PER PROVINCIA						
	SS	OR	NU	SU	CA	TOT
industrie off-grid	4	4	0	4	8	20
reti distribuzione isolate	15	2	22	3	1	43
Totale Sardegna	19	6	22	7	9	63

Source : Traitement META sur les données REF-E

Tableau 2. Emplacement des points de réseau par province et type

Globalement, on estime que la demande de GNL d'ici 2030 sera de près de 32 000 t/an, principalement concentrée dans le sud de la Sardaigne (8 800) et à Sassari (8 700), puis à Cagliari

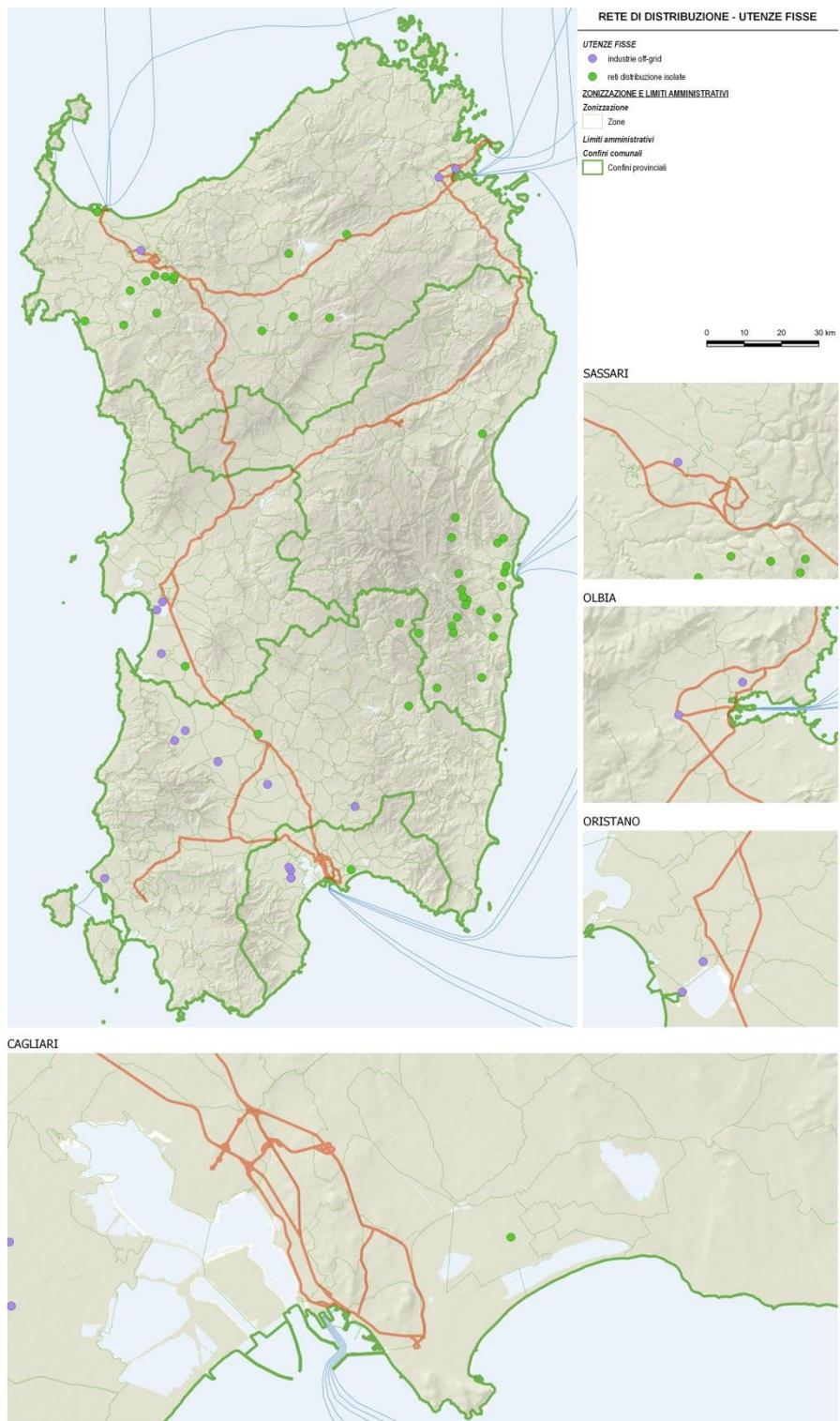
(6 800) et de façon résiduelle à Nuoro (4 100) et Oristano (3 500). Il est naturellement évident que les utilisateurs industriels, moins nombreux, expriment une demande plus importante (près de 20 000 t/an) par rapport aux réseaux de distribution isolés (12 000) (Tableau 3).

	DOMANDA DI GNL al 2030 (t/anno)					TOT
	SS	OR	NU	SU	CA	
industrie off-grid	2.186	3.319	-	8.282	6.185	19.973
reti distribuzione isolate	6.525	188	4.125	563	600	12.000
Totale Sardegna	8.711	3.507	4.125	8.845	6.785	31.973

Source : Traitement META sur les données REF-E

Tableau 3. Emplacement des points de réseau par province et type

Figure 2



EtworkazionetMETA
 Figure 2. Points réseau pour les utilisateurs fixes

STATIONS-SERVICE POUR LA VENTE D'AUTOMOBILES GNL ET L-GNC

La localisation des stations-service pour la vente de GNL automobile s'effectue sur la base de deux grandes étapes méthodologiques

- estimation d'une disposition optimale, basée sur le potentiel estimé illustré pour le scénario "de base" dans le rapport T3.3.1 ;
- comparaison avec les stations-service dont la mise en service est déjà programmée, et définition de la configuration qui en résulte.

Le montage optimal est estimé en comparant le potentiel global estimé de 21,6 kt/an avec un seuil de rentabilité de 3 kt/an pour chaque station-service, ce qui donne un réseau de distribution pour les véhicules à moteur d'environ 7 points de réseau.

Ces points doivent être raisonnablement situés le long du réseau routier le plus utilisé par les véhicules lourds, qui dans le cas de la Région de Sardaigne, comme le souligne le rapport T3.4, est divisé en un nombre assez limité de routes, telles que les suivantes :

- SS131 "Carlo Felice" (112,4 Mvkm de véhicules lourds/an, soit 38,1% de l'ensemble du réseau) ;
- SS131dcn "Nuorese" (40,4 Mvkm lourds/an, soit 13,6% de l'ensemble du réseau) ;
- SS130 "Iglesiente" (9,7 Mvkm lourds/an, 3,3% de l'ensemble du réseau) ;
- SS597 "di Logudoro" (8,7 Mvkm lourds/an, 3,0% de l'ensemble du réseau) ;
- SS729 "Sassari-Olbia" (7,5 Mvkm lourds/an, 2,6% de l'ensemble du réseau) ;
- SS195 "Sulcitana" (7,3 Mvkm lourds/an, 2,4% de l'ensemble du réseau).

Ces axes supportent à eux seuls un trafic d'environ 186 Mvkm lourds/an, soit environ 63% de la consommation estimée pour toute la région de la Sardaigne. En dehors de ce réseau principal, la consommation se répartit comme suit :

Città Metropolitana di Cagliari: 29,3 Mvkm lourds/an (9,9% de l'ensemble du réseau) ;

Province de la Sardaigne du Sud : 36,4 Mvkm lourds/an (12,3%) ;

Province d'Oristano : 7,0 Mvkm lourds/an (3,6%) ;

Province de Nuoro : 10,5 Mvkm lourds/an (2,4%) ;

Province de Sassari : 27,4 Mvkm lourds/an (9,2%).

La couverture maximale du territoire est obtenue en recherchant l'emplacement le plus homogène pour les 7 stations-service, ce qui correspond également à des critères de minimisation de la distance entre les points de distribution (stations-service) et ceux de consommation effective.

En supposant un nombre de 7 points, on peut supposer que chaque station-service comprend dans sa zone une portion du réseau primaire caractérisée par un volume de trafic égal à $296 : 7 = 42,3$ Mvkm lourds/an.

En première approximation, ces points ont été localisés le long des principaux axes routiers énumérés ci-dessus, où se concentre la majeure partie de la demande. Ensuite, pour chaque zone

- le réseau routier de référence a été extrait et, sur la base des flux simulés, le total des vkm/an lourds qui l'affectent a été calculé ;

- l'objet ponctuel (station-service) accessible au coût généralisé le plus bas a été associé.

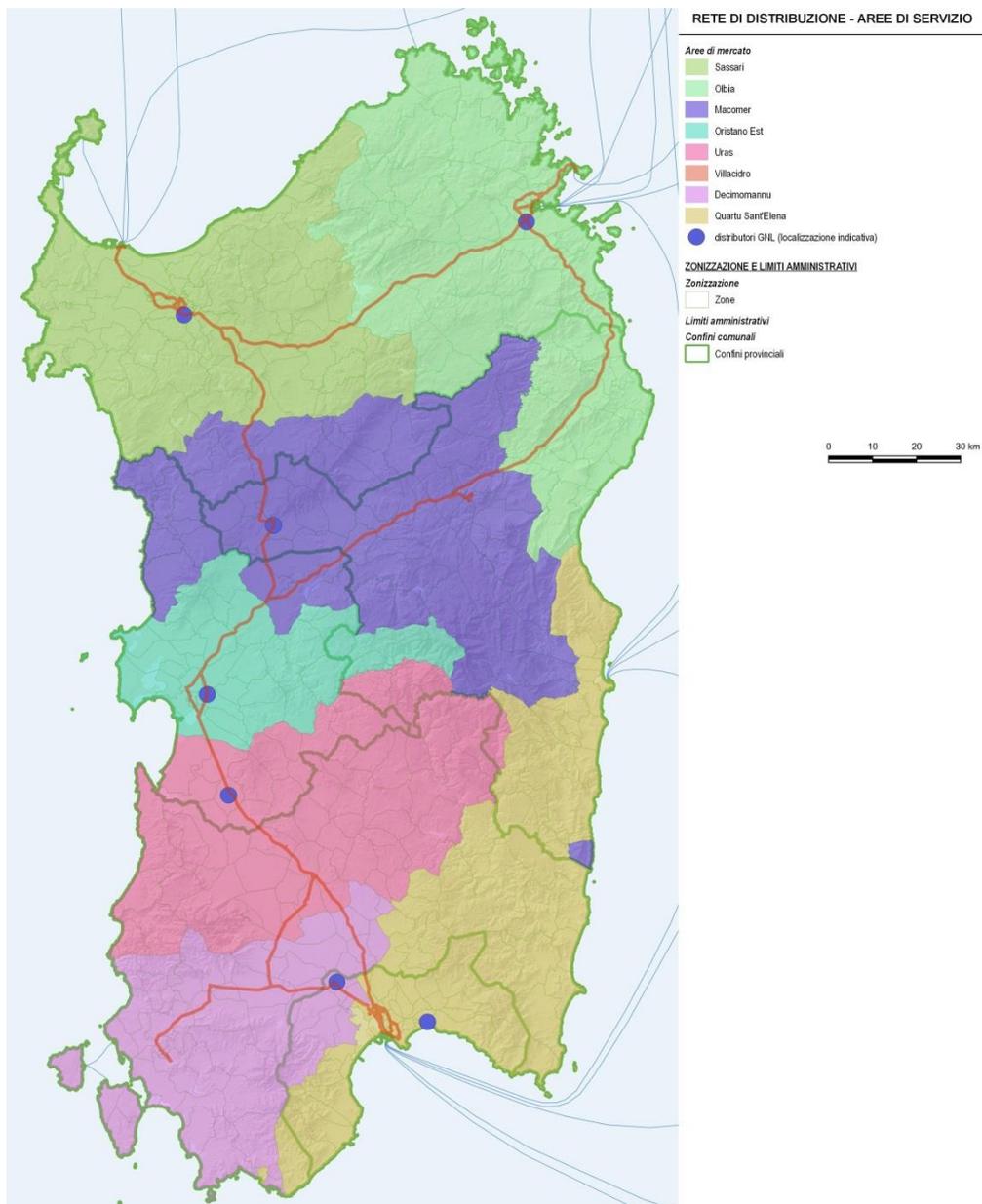
Cela a permis de définir, pour chaque distributeur, non seulement la zone de marché correspondante, mais aussi la demande sous-jacente, qui, comme on peut le voir dans le tableau suivant, varie entre 28,8 et 49,6 millions de véhicules lourds-km/an (Tableau 4).

Åjn	Localisation supposée	Mvkm lourd/année
1	Sassari	43,4
2	Olbia	43,3
3	Macomer	45,3
4	Oristano (est)	28,8
5	Uras (Uras)	49,6
6	Decimomannu, lasne	37,6
7	Quartu Sainte-Hélène	46,0
Tot		294,0

Source : Traitement META

Tableau 4. Localisation hypothétique des stations-service vendant du GNL automobile - scénario théorique

La configuration des différentes zones de marché est présentée dans la Figure 3.



EtworkazionetMETA

Figure 3. Emplacement hypothétique des stations-service GNL - scénario théorique

D'un point de vue méthodologique, la procédure d'identification des points de distribution du GNL sur le réseau routier, réalisée ici sur une base empirique, pourrait être affinée à l'aide d'un algorithme spécifique de partitionnement optimal du graphe en composantes connectées, dont la description est fournie dans le rapport T3.6.

Cette première hypothèse doit toutefois être comparée à l'ensemble des stations-service déjà prévues sur le territoire sarde, composé de 4 emplacements supplémentaires, tous concentrés dans le quadrant sud-ouest de l'île :

- deux dans le port d'Oristano
- une dans la municipalité de Villacidro
- un dans la municipalité d'Uras.

La synthèse nécessaire est obtenue en adaptant l'hypothèse initiale aux emplacements déjà prévus, et notamment

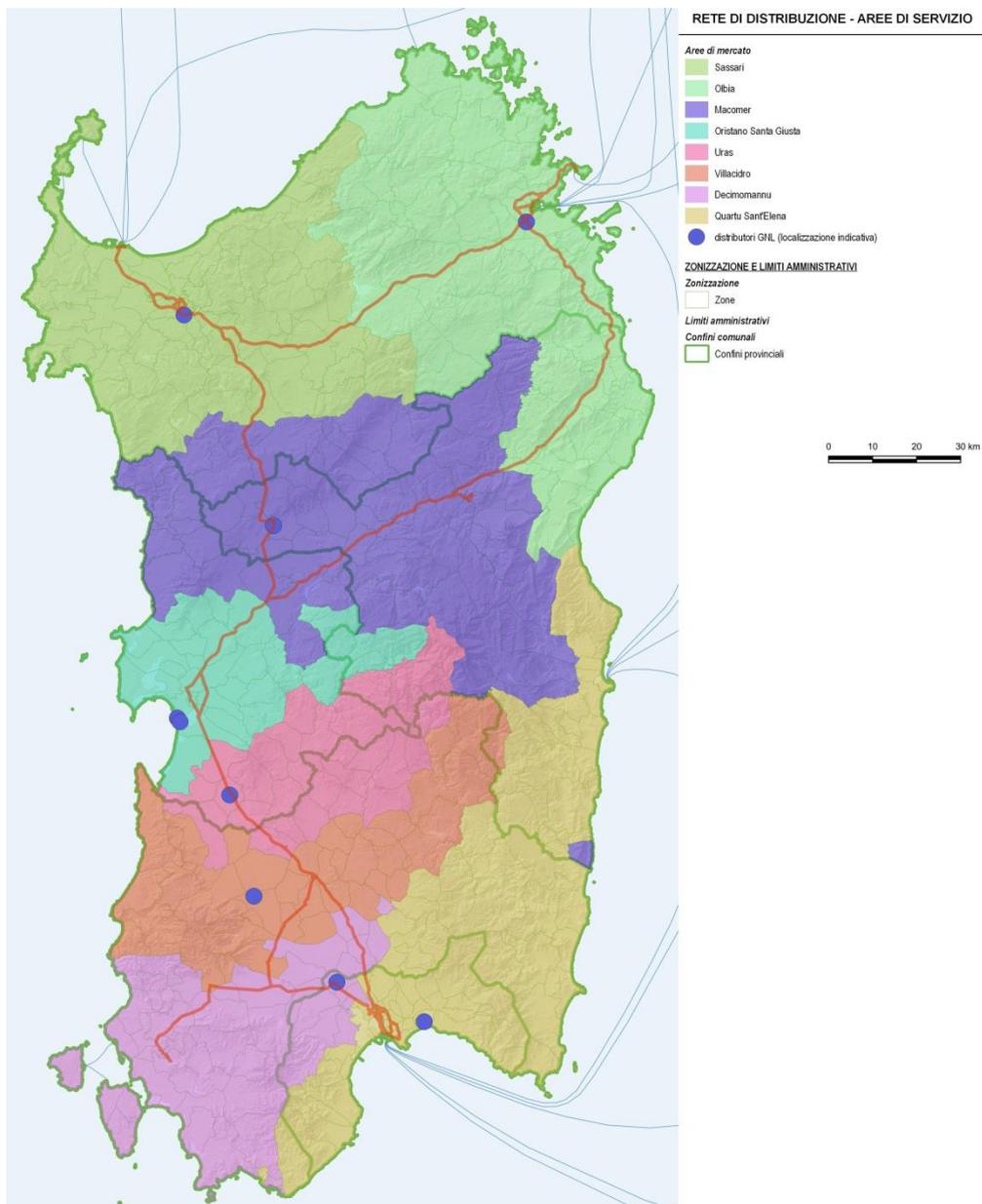
- la station de ravitaillement prévue à l'est d'Oristano est remplacée par celles prévues à l'intérieur du port ;
- la station d'Uras est confirmée
- la station Villacidro est ajoutée.

Le scénario résultant est donc composé de 9 éléments, dont 4 sont déjà planifiés et 5 dérivés du montage théorique, qui ensemble devraient garantir la couverture du service sur l'ensemble du territoire régional (Figure 4). Dans cette disposition, les stations d'Oristano, Uras et Villacidro sont pénalisées par la forte proximité réciproque, avec des zones de marché toujours inférieures à 30 mvkm lourds/an (Tableau 5 Tableau 1).

Âjn	Localisation supposée	Mvkm lourd/année
1	Sassari	43,4
2	Olbia	43,3
3	Macomer	45,9
4à 5 ans	Oristano (S.Giusta)	28,3
6	Uras (Uras)	26,0
7	Villacidro	25,3
8	Decimomannu, lasne	35,8
9	Quartu Sainte-Hélène	46,0
Tot		294,0

Source : Traitement META

Tableau 5. Emplacement hypothétique des stations-service vendant du GNL automobile - solution pratique



Traitement META

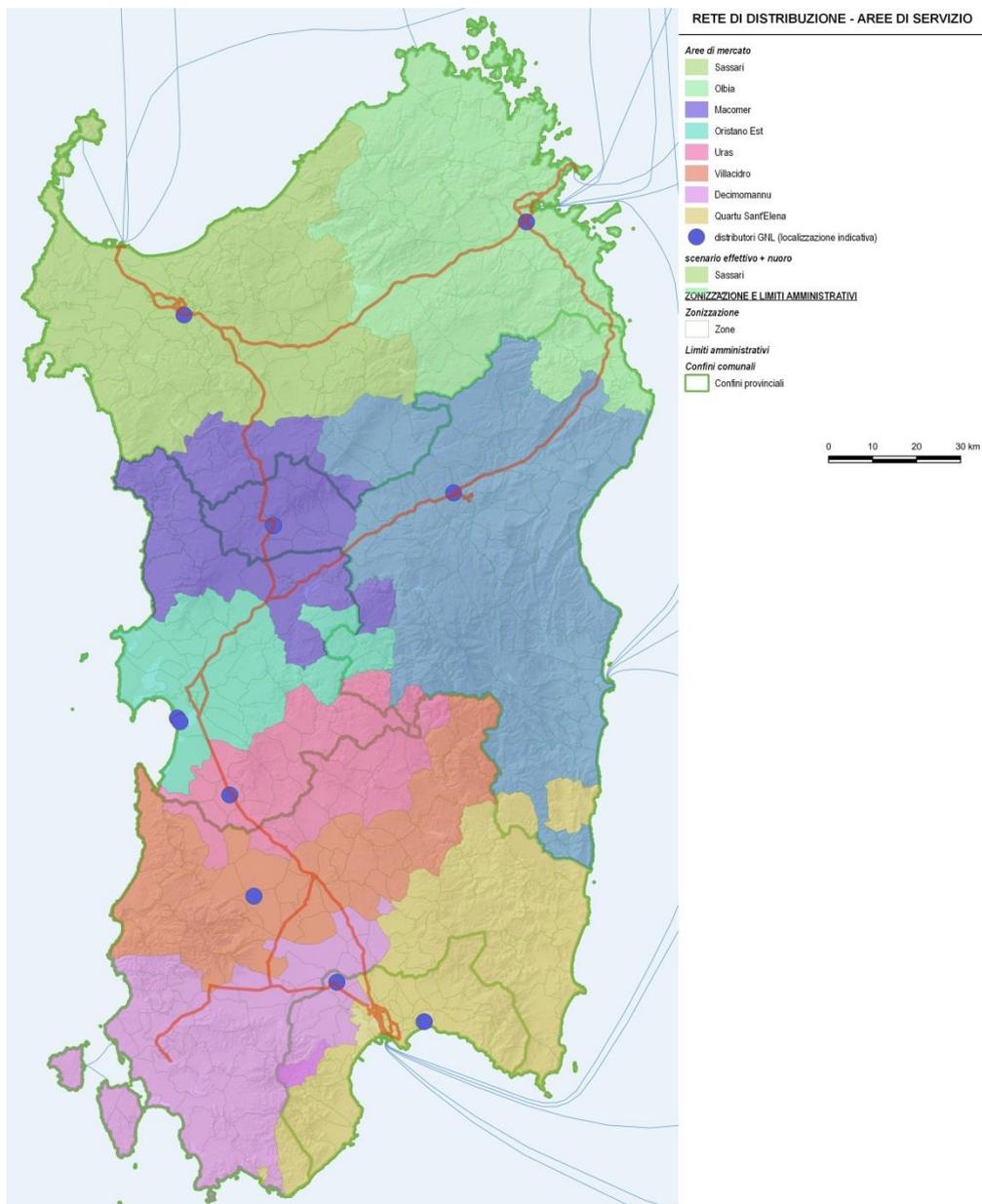
Figure 4. Hypothèse de localisation des stations-service GNL - solution pratique

Des stations supplémentaires sont envisageables afin de réduire les distances moyennes de la station la plus proche. En particulier, un point de ravitaillement supplémentaire à Nuoro pourrait permettre de renforcer le réseau dans le secteur nord-est de l'île. Dans cette dernière hypothèse, on observe une réduction des zones de marché d'Olbia (33,8 Mvkm lourds/an) et de Macomer (28,8), et dans une moindre mesure de Quartu Sant'Elena (42,6) (Tableau 6 et Figure 5).

Âjn	Localisation supposée	Mvkm lourd/année
1	Sassari	43,4
2	Olbia	33,8
3	Nuoro	30,0
4	Macomer	28,8
5-6	Oristano (S.Giusta)	28,3
7	Uras (Uras)	25,9
8	Villacidro	25,3
9	Decimomannu, lasne	35,9
10	Quartu Sainte-Hélène	42,6
Tot		294,0

Source : Traitement META

Tableau 6. Emplacement hypothétique des stations-service avec vente de GNL automobile - scénario pratique modifié



EtworkazionetMETA

Figure 5. Emplacement hypothétique des stations-service GNL - scénario pratique modifié

ESTIMATION DU NOMBRE DE VOYAGES/AN

L'ensemble des sites supposés ici définit un ensemble de 76 points de réseau à approvisionner en GNL et qui, selon le scénario de base, sont estimés exprimer une demande totale de 63 mille tonnes de GNL en 2030. Parmi ceux-ci, près de la moitié est attribuable aux stations-service pour véhicules à moteur, un tiers est attribuable aux industries *off-grid*, tandis que le reste se répartit entre les 43 points des réseaux de distribution isolés et 4 points supplémentaires relatifs aux quais portuaires utilisés pour le avitaillement *truck-to-ship* (Tableau 7).

Dans le cas des stations-service, le "scénario pratique" à 9 points a été pris comme référence, et la demande annuelle de GNL de chaque point a été estimée en distribuant le total annuel régional au prorata du kilométrage associé à chaque station-service.

La valeur de 27 000 tonnes/an mentionnée pour les distributeurs de GNL/GNC comprend à la fois la demande de véhicules lourds alimentés en GNL et la demande de véhicules lourds et légers alimentés en GNL regazéifié (GNL-GNC) à partir des dépôts satellites de GNL des distributeurs considérés.

Par conséquent, la demande totale de GNL est de 63 kt.

PUNTI RETE PER PROVINCIA AL 2030						
	SS	OR	NU	SU	CA	TOT
industrie off-grid	4	4	0	4	8	20
reti distribuzione isolate	15	2	22	3	1	43
distributori GNL/GNC	3	3	1	1	1	9
Porti con banchine utilizzate per Bunkeraggio Truck-to-Ship	2	1	0	0	1	4
Totale Sardegna	24	10	23	8	11	76

DOMANDA DI GNL al 2030 (t/anno)						
	SS	OR	NU	SU	CA	TOT
industrie off-grid	2.186	3.319	-	8.282	6.185	19.973
reti distribuzione isolate	6.525	188	4.125	563	600	12.000
distributori GNL/GNC	7.962	4.987	4.215	2.323	7.512	27.000
Porti con banchine utilizzate per Bunkeraggio Truck-to-Ship	1.000	500	-	-	2.500	4.000
Totale Sardegna	17.673	8.994	8.340	11.168	16.797	62.973

Source : Traitement META

Tableau 7. Points du réseau et demande annuelle de GNL - scénario de base

En supposant une capacité de 20 t/citerne, cela donne un total d'environ 3'150 voyages/an, sans compter les retours à vide.

L'ensemble des localisations ici supposées correspond, dans le cas du système de distribution SOMD (*Single Origin - Multiple Destination*) avec lieu d'origine dans le port d'Oristano, à un vecteur 1 x 76.

En supposant plutôt 5 lieux d'origine distincts (Oristano, Porto Torres, Olbia, Cagliari, Portovesme) on obtient une matrice 5 x 76. Dans ce cas, il est possible de supposer que chaque point de réseau est desservi par la localité d'origine reliée par la route de moindre risque, avec une réduction du coût social lié à la circulation des citernes cryogéniques le long du réseau routier

sarde. Toutefois, cette réduction devra être mise en balance avec les coûts et les risques liés à la construction de multiples installations de déchargement.

2. Aspects méthodologiques : calcul du coefficient de risque

L'introduction du GNL sur le territoire sarde implique quelques problèmes liés à la configuration du réseau de distribution et aux modalités de son approvisionnement, qui devrait être effectué au moyen de camions-citernes cryogéniques, qui se déplacent des ports de déchargement du gaz vers les différents points du réseau.

Une exigence évidente de ce réseau de distribution est sa sécurité, c'est-à-dire la maîtrise des risques (modestes, mais pas totalement négligeables) associés au déplacement des camions-citernes, dans des limites socialement acceptables.

À cette fin, il est conseillé d'effectuer une étude approfondie des **itinéraires à risque minimum** entre les points de chargement et de déchargement du produit.

Cette investigation peut être réalisée au moyen d'un modèle de simulation, déjà utilisé pour reconstituer les flux de trafic sur le réseau, en associant à chaque arc routier un coefficient de risque obtenu comme le produit de la probabilité qu'un accident routier impliquant un camion-citerne s'y produise, et de l'entité des dommages potentiellement associés à un tel événement.

$$\text{Coefficient de risque} = \text{probabilité de perte} \times \text{dommage potentiel}$$

La construction d'un tel coefficient a fait l'objet, ces dernières années, de nombreuses études approfondies liées à la gestion des flux de marchandises dangereuses sur le réseau national (Bonvicini, Leonelli et Spadoni 1998 ; Leonelli, Bonvicini et Spadoni 2000 ; Orso Giaccone et al. 2012 ; Studer et al. 2012 ; 2018 ; Borghetti et al. 2015 ; Gandini et al. 2015), qui ont été prises comme référence pour le calcul des indicateurs de risque.

En particulier, dans l'analyse suivante, il a été fait référence au modèle d'analyse des risques **DGT (Dangerous Goods Transportation)**, qui fonde l'estimation du coût social associé à un itinéraire spécifique sur l'algorithme suivant (Studer et al. 2012)

$$R_{ij} = \sum_k R_k = \sum_k \left(p_k \times \sum_s \left(p_{k,s} \times \sum_e \left(p_{k,s,e} \times \sum_m \left(F_{k,m} \times E_{k,s,e,m} \times S_m \times (1 - C_{k,s,e,m}) \right) \right) \right) \right)$$

Où:

R_{ij}	Risque cumulatif sur l'itinéraire [€/an]	
R_k	Risque total associé au transit sur le k -ième arc du graphe [€/année]	
p_k	Probabilité d'occurrence d'un accident de la route sur l'arc k [véhicules impliqués/arc/an].	PROBABILITÉ CUMULATIVE D'ÉVÉNEMENTS INDÉSIRABLES
$p_{k,s}$	Probabilité d'un accident de la route sur l'arc k impliquant un véhicule transportant la substance s .	
$p_{k,s,e}$	Probabilité qu'un accident de la route sur l'arc k , impliquant un véhicule transportant une substance s , conduise à un événement indésirable de type e	
$F_{k,m}$	Facteur de présence du récepteur m le long de l'arc k	LES DOMMAGES ASSOCIÉS À CHAQUE ÉVÉNEMENT INDÉSIRABLE
$E_{k,s,j,m}$	Facteur d'exposition du récepteur m le long de l'arc k à l'événement indésirable e impliquant la substance s	
S_m	Susceptibilité du récepteur m	
$C_{k,s,e,m}$	Résilience/capacité de récupération des récepteurs m	

Dans le cas présent, la substance de référence est unique (GNL) et l'indice s peut donc être omis pour obtenir la formulation suivante:

$$R_{ij} = \sum_k R_k = \sum_i \left(p_k \times \sum_e \left(p_{k,e} \times \sum_m \left(F_{k,m} \times E_{k,e,m} \times S_m \times (1 - C_{k,s,e,m}) \right) \right) \right)$$

Les autres indices liés aux arcs simples du graphe (k), au type d'événement indésirable (e) et à la présence, la susceptibilité et la résilience du récepteur (m) sont maintenus.

Comme prévu partiellement dans le rapport T3.4, en première approximation, la construction du coefficient de risque sur chaque arc a été obtenue au moyen de deux séries distinctes de données statistiques, que l'on peut retracer respectivement

- en ce qui concerne la probabilité cumulée d'événements indésirables, aux niveaux d'accident rencontrés sur le réseau routier sarde, comme cela est mieux spécifié au chapitre 0;
- en ce qui concerne les dommages potentiellement associés à chaque événement indésirable, à la présence, à la susceptibilité et à la résilience des sujets potentiellement exposés, identifiés dans les automobilistes en transit, dans les personnes vivant autour de la route, ainsi que dans les zones sensibles du point de vue naturaliste, comme mieux spécifié au chapitre 0.

Pour l'instant, aucune analyse approfondie n'a été menée sur le type d'accident lié à la circulation des navires-citernes cryogéniques.

3. Analyse des accidents sur le réseau routier de la Sardaigne

3.1. Généralités

Le coefficient de risque est basé, tout d'abord, sur les taux d'accidents, calculés à partir de la probabilité de survenue d'un accident en fonction du type de route et de l'entité du flux de véhicules qui la traverse.

En résumé, étant donné la reconstitution des volumes de trafic du réseau routier effectuée à l'aide du modèle de trafic selon la méthodologie exposée dans les paragraphes précédents, la procédure de calcul du coefficient de risque en ce qui concerne la reconstitution du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par an passe par les phases suivantes:

- a) l'acquisition de données sur les accidents, mises à disposition par l'ISTAT
- b) codification des routes sur le graphique routier et comparaison entre les statistiques d'accidents et les volumes de trafic;
- c) la reconstitution, pour chaque arc routier du modèle, du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par an.

3.2. Acquisition de données sur les accidents

Les données sur les accidents de la route sur lesquelles repose la présente méthodologie proviennent de la base de données ISTAT. Les données, recueillies par l'institut de statistique au moyen d'enquêtes mensuelles sur l'ensemble du territoire national, prennent en compte les accidents qui ont causé des blessures aux personnes impliquées (blessées ou décédées dans le trentième jour suivant l'accident). Par conséquent, les accidents pour lesquels seuls des dommages matériels ont été enregistrés ne sont pas pris en compte¹.

L'intervalle de temps choisi est la dernière période de cinq ans disponible (2014-2018). Le choix de cet intervalle de temps a été dicté par la nécessité de disposer d'une base de données suffisamment importante pour être statistiquement pertinente.

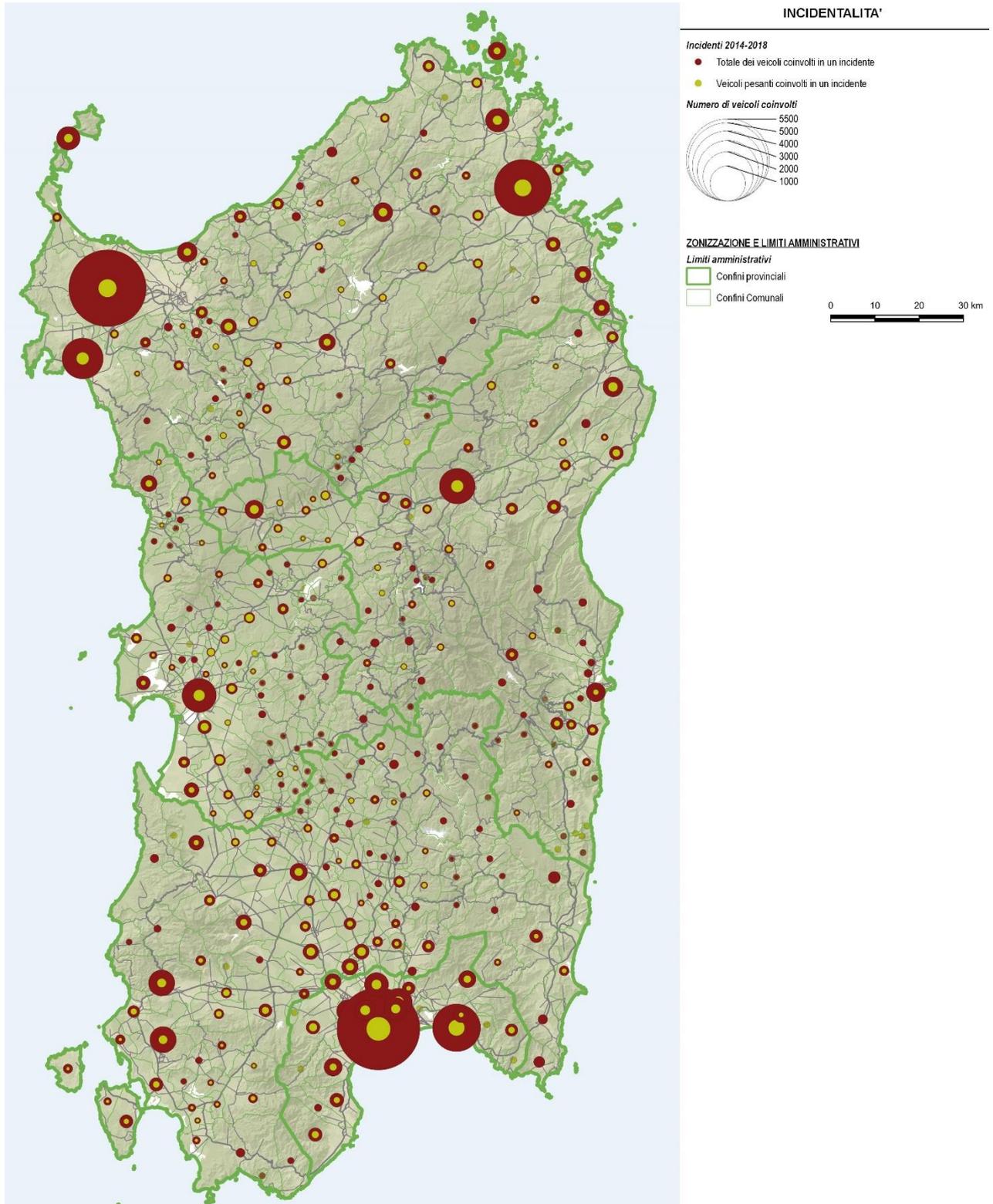
L'analyse de l'accidentalité pour le calcul du coefficient de risque a été élaborée en tenant compte des accidents survenus sur les routes nationales de la région de la Sardaigne. En particulier, la localisation de l'accident sur le réseau a été déterminée en croisant les données concernant le code communal et celles relatives à l'abréviation de la route nationale.

Ce choix a été dicté, d'une part, par la configuration particulière du réseau d'infrastructure régional, compte tenu notamment du fait que la mobilité des véhicules lourds, à l'exclusion du «dernier kilomètre», s'effectue principalement sur ce type de route, et d'autre part, par la qualité même des données ISTAT. En effet, les informations relatives à la localisation de l'accident unique ne sont

¹ Rappelez-vous que l'accident de la route est «*le fait que cela s'est produit dans les rues ou les places ouvertes à la circulation dans lesquelles les véhicules (ou les animaux) arrêtés ou en mouvement sont impliqués et d'où les blessures aux personnes*». ISTAT, aspects méthodologiques de l'enquête. Détection des accidents de la route avec blessures corporelles.

pas diffusées sous forme de coordonnées géographiques mais peuvent être reconstituées en croisant les données suivantes : le code communal, le type de route (domaniale, urbaine, suburbaine, etc.), le sigle de la route (dont seule la partie numérique est reportée), le kilométrage progressif s'il est présent et la toponymie (cette dernière information n'est diffusée que jusqu'à l'année 2016 incluse).

Pour étayer ce choix, une analyse préliminaire a été réalisée, qui donne une image du taux d'accidents sur la période de cinq ans considérée. Sur un total de 17 423 accidents sur l'ensemble du réseau du territoire régional au cours de la période considérée, 1 366 accidents se sont produits avec l'implication d'un véhicule lourd (la base de données ISTAT ne donne pas de détails sur les sous-catégories de véhicules lourds), soit un pourcentage de 7,8%. Parmi ces accidents, 776 se sont produits sur des routes dont le code est signalé dans la base de données (elles peuvent donc être localisées) et, en particulier, 523 accidents se sont produits sur des routes nationales. Il est donc correct de penser que l'étude des seules routes nationales peut être considérée comme un bon compromis en ce qui concerne le risque d'accident, surtout si elle vise à analyser le risque impliquant les camions, sans être trop onéreuse en termes de temps ou de coût (Figure 6).



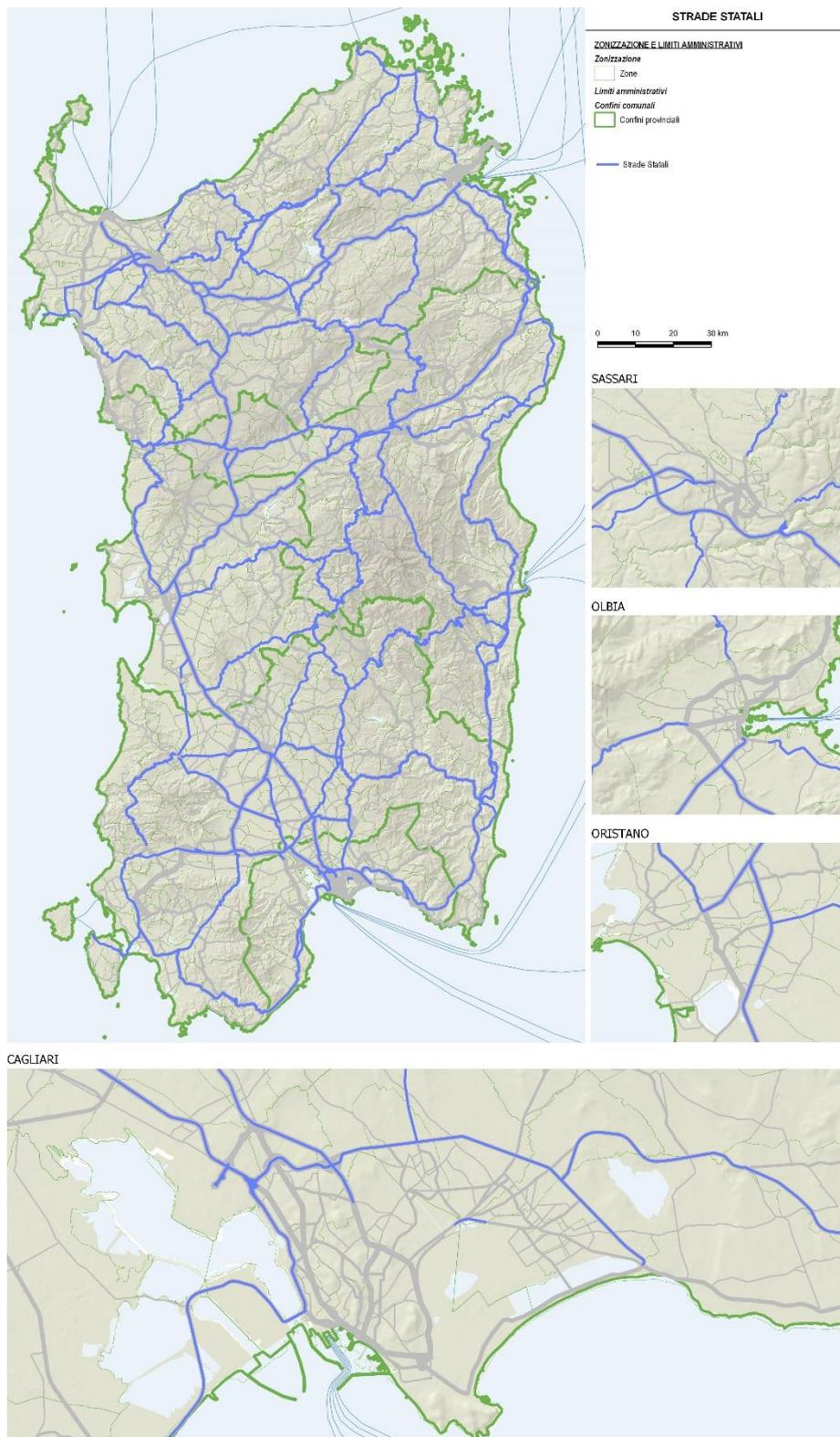
EtworkazionetMETA

Figure 6. Localisation des accidents sur une base municipale (2014-2018)

3. Encodage des routes sur le graphique

Une opération préliminaire fondamentale pour une localisation correcte des accidents sur le réseau des routes nationales en Sardaigne a consisté à identifier toutes les routes d'intérêt et à établir par la suite un registre de référence. Par la suite, chacune de ces routes a été codée sur le graphique routier utilisé par le modèle, ce qui a permis de comparer les flux, issus des simulations, avec les données d'accidents, issues de l'analyse des données ISTAT² (Figure 7 et Tableau 8

² La principale source utilisée pour le codage des routes d'État est le graphique routier ANAS, se référant à 2015 et disponible à partir de <http://dati.mit.gov.it/catalog/dataset/grafico-stradale-anas>



Source : Élaborations META
 Figure 7. Répartition du kilométrage des camions

COD	NOME STRADA	Veicoli*km/anno		
		Leggeri	Pesanti	Totali
NSA167	DI ITTIRI	1.935.844	-	1.935.844
SS125	ORIENTALE SARDA	169.694.581	1.198.726	170.893.307
SS127	SETTENTRIONALE SARDA	184.238.463	3.037.067	187.275.531
SS127bis	SETTENTRIONALE SARDA	12.939.580	43.979	12.983.559
SS128bis	CENTRALE SARDA	71.384.879	243.678	71.628.557
SS129	TRASVERSALE SARDA	4.197.357	1.147.850	5.345.208
SS131	CARLO FELICE	627.158.889	45.350.242	672.509.131
SS131bis	CARLO FELICE	27.046.980	-	27.046.980
SS131dir-centr	NUORESE	200.048.594	-	200.048.594
SS132	DI OZIERI	24.439.667	-	24.439.667
SS133	DI PALAU	43.864.502	93.408	43.957.911
SS133bis	DI PALAU	22.170.798	-	22.170.798
SS134	DI CASTEL SARDO	166.972	-	166.972
SS199	DI MONTI	52.203	-	52.203
SS200	DELL'ANGLONA	76.300.946	493.671	76.794.617
SS291	DELLA NURRA	42.531.527	576.092	43.107.619
SS291var	DELLA NURRA	8.894.300	-	8.894.300
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	19.346.555	1.108.068	20.454.624
SS292dir	NORD OCCIDENTALE SARDA	6.801.951	-	6.801.951
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	9.104.141	112.446	9.216.588
SS389dir-a	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	4.590.940	-	4.590.940
SS392	DEL LAGO DEL COGHINAS	15.979.772	-	15.979.772
SS427	DELLA GALLURA CENTRALE	30.899.131	135.042	31.034.173
SS597	DI LOGUDORO	143.839.833	11.834.395	155.674.228
SS672	SASSARI - TEMPIO	59.924.210	2.657.636	62.581.846
SS729	SASSARI - OLBIA	114.514.178	7.505.514	122.019.693
PROVINCIA DI SASSARI		1.924.435.160	73.169.452	1.997.604.612
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	27.575.969	658.866	28.234.835
SS128	CENTRALE SARDA	3.528.637	22.814	3.551.451
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	26.068.397	9.899	26.078.296
SS131	CARLO FELICE	570.242.655	45.350.242	615.592.898
SS131dir-centr	NUORESE	90.393.150	-	90.393.150
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	146.619.486	1.108.068	147.727.554
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	65.737.550	94.637	65.832.187
SS442	DI LACONI E DI URAS	25.795.690	-	25.795.690
PROVINCIA DI ORISTANO		941.475.624	61.730.437	1.003.206.061
SS125	ORIENTALE SARDA	120.964.313	1.198.726	122.163.039
SS125var	NUOVA SS125	9.790.218	-	9.790.218
SS128	CENTRALE SARDA	93.421.942	22.814	93.444.757
SS129	TRASVERSALE SARDA	169.516.458	1.147.850	170.664.308
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	24.559.468	9.899	24.569.367
SS131	CARLO FELICE	110.894.984	45.350.242	156.245.226
SS131dir-centr	NUORESE	836.306.216	-	836.306.216
SS198	DI SEUI E LANUSEI	94.778.132	233.333	95.011.466
SS295	DI ARITZO	18.782.426	25.972	18.808.399
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	13.964.420	94.637	14.059.057
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	33.677.882	112.446	33.790.329
SS389dir-b	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	16.639.481	-	16.639.481
SS389var	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	107.212.133	-	107.212.133
SS390	DI BARI SARDO	2.937.001	89.285	3.026.286
PROVINCIA DI NUORO		1.678.824.429	22.905.850	1.701.730.280
SS125	ORIENTALE SARDA	6.675.037	1.198.726	7.873.763
SS125var	NUOVA SS125	165.893.041	-	165.893.041
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	212.614.257	658.866	213.273.123
SS126dir	SUD OCCIDENTALE SARDA	44.650.608	-	44.650.608
SS128	CENTRALE SARDA	162.785.858	22.814	162.808.672
SS130	IGLESIENTE	240.813.392	8.618.031	249.431.423
SS130dir	IGLESIENTE	17.390.671	-	17.390.671
SS131	CARLO FELICE	552.615.519	45.350.242	597.965.762
SS195	SULCITANA	132.569.703	283.295	132.852.998
SS196	DI VILLACIDRO	114.240.839	6.390.725	120.631.564
SS196dir	DI VILLACIDRO	29.301.087	-	29.301.087
SS197	DI SAN GAVINO E DEL FLUMINI	186.437.843	971.903	187.409.746
SS198	DI SEUI E LANUSEI	26.636.137	233.333	26.869.470
SS293	DI GIBA	96.702.279	1.343.987	98.046.266
SS387	DEL GERREI	119.145.136	260.938	119.406.074
SS466	DI SIBIOLA	38.608.397	744.825	39.353.222
SS547	DI GUASILA	33.920.031	494.553	34.414.584
PROVINCIA DI SUD SARDEGNA		2.179.059.404	68.512.668	2.247.572.073
SS125var	NUOVA SS125	133.203.574	-	133.203.574
SS130	IGLESIENTE	204.384.144	8.618.031	213.002.175
SS130dir	IGLESIENTE	5.184.145	-	5.184.145
SS131	CARLO FELICE	123.812.617	45.350.242	169.162.860
SS131dir	CARLO FELICE	110.940.850	1.942.329	112.883.179
SS195	SULCITANA	295.750.982	283.295	296.034.277
SS195racc	VIA S. PAOLO	58.438.967	-	58.438.967
SS196	DI VILLACIDRO	9.113.699	6.390.725	15.504.423
SS387	DEL GERREI	66.896.433	260.938	67.157.370
SS391	DI ELMAS	-	7.627	7.627
SS554	CAGLIARITANA	277.121.318	6.568.200	283.689.518
CITTA' METROPOLITANA DI CAGLIARI		1.321.905.452	32.362.662	1.354.268.114
TOTALE		8.045.700.070	258.681.070	8.304.381.140

Source : Traitement META

Tableau 8. Itinéraires par route nationale

Grâce à ce traitement, il est également possible de faire une première évaluation du rôle joué par le réseau des routes nationales dans la région. En particulier, 56% du kilométrage simulé est concentré sur ces routes, ce qui atteint 83% pour les seuls camions. (Tableau 9)

CONCENTRAZIONE DEI FLUSSI SULLA RETE DELLE STRADE STATALI						
	leggeri		pesanti		totale	
	mvkm/giorno	%	mvkm/giorno	%	mveqkm/giorno	%
Strade statali	12,83	53%	0,84	83%	14,5	56%
Resto rete	11,21	47%	0,17	17%	11,6	44%
TOTALE	24,04	100%	1,02	100%	26,1	100%

Source : Traitement META

Tableau 9. Concentration des flux sur le réseau routier national

3.4. Calcul du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par an

Une fois effectuées les opérations préliminaires décrites ci-dessus, il est alors possible d'associer chaque accident unique survenu sur une route nationale (à travers le code de la commune et l'abréviation de la route nationale) à la portion de route nationale du graphique ayant le même code qui insiste sur ce territoire communal spécifique et, par conséquent, d'obtenir le nombre de véhicules impliqués dans les accidents (données extractibles de la base de données ISTAT) sur ce tronçon particulier.

Les sections de route présentant le plus grand nombre d'accidents ont ensuite été identifiées, mettant en évidence 3 niveaux de service :

- route non étatique (dans notre cas, neutre puisque le nombre d'accidents n'est pas rapporté)
- route nationale sans accident signalé au cours de la période de cinq ans 2014-2018
- route nationale avec des accidents détectés dans la période de cinq ans 2014-2018

Les résultats obtenus sur l'ensemble du réseau sont présentés dans le tableau 10, qui rapporte pour chaque route de l'État sarde **les taux d'accidents, de blessures et de mortalité**, obtenus en comparant respectivement le nombre d'accidents, de personnes impliquées (morts + blessés) et de personnes tuées au volume de trafic. Comme on peut l'observer, ces taux varient considérablement d'une route à l'autre, ce qui entraîne non rarement le cas d'artères à trafic limité, cependant caractérisées par un certain nombre d'accidents et donc, au final, par des taux d'accidents relativement élevés par rapport au reste du réseau.

COD	NOME STRADA	Veicoli*km/ANNO	n° incidenti per 100 Mvkm	persone coinvolte per 100 Mvkm	n° morti per 100 Mvkm
NSA167	DI ITTIRI	1.935.844	10,3	10,3	10,3
SS125	ORIENTALE SARDA	170.893.307	25,5	40,5	0,6
SS127	SETTENTRIONALE SARDA	187.275.531	12,6	22,0	0,3
SS127bis	SETTENTRIONALE SARDA	12.983.559	98,6	180,2	3,1
SS128bis	CENTRALE SARDA	71.628.557	7,0	11,4	0,8
SS129	TRASVERSALE SARDA	5.345.208	11,2	37,4	0,0
SS131	CARLO FELICE	672.509.131	10,4	16,7	0,1
SS131bis	CARLO FELICE	27.046.980	6,7	12,6	0,7
SS131dir-centr	NUORESE	200.048.594	7,2	11,0	0,3
SS132	DI OZIERI	24.439.667	4,1	7,4	0,0
SS133	DI PALAU	43.957.911	11,4	19,6	0,9
SS133bis	DI PALAU	22.170.798	8,1	10,8	0,9
SS134	DI CASTEL SARDO	166.972	239,6	359,3	0,0
SS199	DI MONTI	52.203	383,1	1149,3	0,0
SS200	DELL'ANGLONA	76.794.617	18,2	34,4	0,8
SS291	DELLA NURRA	43.107.619	35,3	58,0	1,4
SS291var	DELLA NURRA	8.894.300	6,7	20,2	4,5
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	20.454.624	13,7	21,5	0,0
SS292dir	NORD OCCIDENTALE SARDA	6.801.951	8,8	11,8	0,0
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	9.216.588	17,4	19,5	4,3
SS389dir-a	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	4.590.940	13,1	17,4	0,0
SS392	DEL LAGO DEL COGHINAS	15.979.772	10,0	12,5	0,0
SS427	DELLA GALLURA CENTRALE	31.034.173	5,2	7,7	0,0
SS597	DI LOGUDORO	155.674.228	7,6	16,8	0,6
SS672	SASSARI - TEMPIO	62.581.846	5,1	11,5	0,6
SS729	SASSARI - OLBIA	122.019.693	6,6	13,6	0,0
PROVINCIA DI SASSARI		1.997.604.612	12,1	20,6	0,4
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	28.234.835	12,8	21,3	1,4
SS128	CENTRALE SARDA	3.551.451	33,8	50,7	5,6
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	26.078.296	23,8	43,7	0,0
SS131	CARLO FELICE	615.592.898	3,8	6,3	0,3
SS131dir-centr	NUORESE	90.393.150	5,3	8,4	0,2
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	147.727.554	8,0	13,0	0,1
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	65.832.187	8,8	15,8	1,5
SS442	DI LACONI E DI URAS	25.795.690	7,8	12,4	0,8
PROVINCIA DI ORISTANO		1.003.206.061	20,3	34,9	0,7
SS125	ORIENTALE SARDA	122.163.039	27,0	41,1	2,0
SS125var	NUOVA SS125	9.790.218	22,5	32,7	2,0
SS128	CENTRALE SARDA	93.444.757	6,6	8,8	0,6
SS129	TRASVERSALE SARDA	170.664.308	13,2	25,7	1,6
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	24.569.367	25,2	53,7	0,8
SS131	CARLO FELICE	156.245.226	5,0	9,5	0,0
SS131dir-centr	NUORESE	836.306.216	4,4	7,5	0,2
SS198	DI SEUI E LANUSEI	95.011.466	8,2	13,7	0,6
SS295	DI ARITZO	18.808.399	12,8	12,8	0,0
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	14.059.057	10,0	12,8	1,4
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	33.790.329	32,0	55,0	1,2
SS389dir-b	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	16.639.481	4,8	6,0	0,0
SS389var	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	107.212.133	2,6	5,6	0,6
SS390	DI BARI SARDO	3.026.286	138,8	231,3	0,0
PROVINCIA DI NUORO		1.701.730.280	8,5	14,4	0,6
SS125	ORIENTALE SARDA	7.873.763	63,5	78,7	2,5
SS125var	NUOVA SS125	165.893.041	3,7	6,3	0,1
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	213.273.123	13,1	25,1	0,7
SS126dir	SUD OCCIDENTALE SARDA	44.650.608	2,7	9,4	0,0
SS128	CENTRALE SARDA	162.808.672	7,5	15,2	0,4
SS130	IGLESIENTE	249.431.423	7,6	11,8	0,6
SS130dir	IGLESIENTE	17.390.671	9,2	21,9	0,0
SS131	CARLO FELICE	597.965.762	5,3	8,9	0,2
SS195	SULCITANA	132.852.998	5,6	10,5	0,6
SS196	DI VILLACIDRO	120.631.564	12,9	24,7	2,0
SS196dir	DI VILLACIDRO	29.301.087	13,0	22,5	0,0
SS197	DI SAN GAVINO E DEL FLUMINI	187.409.746	7,0	13,4	0,5
SS198	DI SEUI E LANUSEI	26.869.470	8,9	11,2	0,0
SS293	DI GIBA	98.046.266	7,5	12,0	0,2
SS387	DEL GERREI	119.406.074	11,2	18,1	0,8
SS466	DI SIBIOLA	39.353.222	10,7	14,2	0,0
SS547	DI GUASILA	34.414.584	12,2	22,7	0,0
PROVINCIA DI SUD SARDEGNA		2.247.572.073	7,9	13,8	0,5
SS125var	NUOVA SS125	133.203.574	5,3	9,9	0,5
SS130	IGLESIENTE	213.002.175	14,7	29,1	0,3
SS130dir	IGLESIENTE	5.184.145	11,6	23,1	0,0
SS131	CARLO FELICE	169.162.860	9,6	16,2	0,5
SS131dir	CARLO FELICE	112.883.179	45,9	77,1	0,5
SS195	SULCITANA	296.034.277	14,7	23,9	0,7
SS195racc	VIA S. PAOLO	58.438.967	8,6	13,0	0,0
SS196	DI VILLACIDRO	15.504.423	7,7	16,8	0,0
SS387	DEL GERREI	67.157.370	8,0	16,4	0,9
SS391	DI ELMAS	7.627	1311,8	15734,2	0,0
SS554	CAGLIARITANA	283.689.518	14,3	23,5	0,6
CITTA' METROPOLITANA DI CAGLIARI		1.354.268.114	13,0	22,9	0,8
TOTALE		8.304.381.140	10,0	17,1	0,5

Source : Traitement META

Tableau 10. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - tous les sinistres

Les mêmes taux peuvent également être déterminés en se référant uniquement aux accidents impliquant au moins un véhicule lourd, comme le montre le Tableau 11. Dans ce cas, une variabilité encore plus grande apparaît, caractérisée par des pics sur les embranchements de routes importantes, comme la SS127bis et la SS129bis³, contre des valeurs minimales trouvées sur les routes les plus utilisées, comme la SS131 «Carlo Felice».

COD	NOME STRADA	Pesanti*km / anno	n° incidenti per 100 Mvkm	persone coinvolte per 100 Mvkm	n° morti per 100 Mvkm
SS125	ORIENTALE SARDA	1.198.726	333,7	467,2	0,0
SS127	SETTENTRIONALE SARDA	3.037.067	92,2	138,3	0,0
SS127bis	SETTENTRIONALE SARDA	43.979	1364,3	1364,3	0,0
SS128bis	CENTRALE SARDA	243.678	82,1	164,2	82,1
SS131	CARLO FELICE	45.350.242	26,9	42,8	0,4
SS133	DI PALAU	93.408	642,3	1284,7	0,0
SS200	DELL'ANGLONA	493.671	283,6	567,2	0,0
SS291	DELLA NURRA	576.092	173,6	277,7	34,7
SS427	DELLA GALLURA CENTRALE	135.042	296,2	740,5	0,0
SS597	DI LOGUDORO	11.834.395	22,0	32,1	5,1
SS672	SASSARI - TEMPIO	2.657.636	45,2	82,8	0,0
SS729	SASSARI - OLBIA	7.505.514	8,0	18,7	0,0
PROVINCIA DI SASSARI		73.169.452	37,7	60,4	1,6
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	658.866	91,1	121,4	0,0
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	9.899	2020,4	4040,9	0,0
SS131	CARLO FELICE	59.858.967	11,0	18,7	1,0
SS292	NORD OCCIDENTALE SARD/	1.108.068	90,2	234,6	0,0
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROL	94.637	1056,7	1268,0	211,3
PROVINCIA DI ORISTANO		61.730.437	33,0	55,7	1,3
SS125	ORIENTALE SARDA	1.198.689	166,8	283,6	16,7
SS128	CENTRALE SARDA	22.814	876,6	876,6	0,0
SS129	TRASVERSALE SARDA	1.147.850	209,1	365,9	17,4
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	52.043	1537,2	3074,4	0,0
SS131	CARLO FELICE	20.023.418	6,0	10,0	0,0
SS198	DI SEUI E LANUSEI	233.333	257,1	514,3	0,0
SS295	DI ARITZO	25.972	770,0	770,0	0,0
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORRE	112.446	889,3	889,3	0,0
SS390	DI BARI SARDO	89.285	448,0	672,0	0,0
PROVINCIA DI NUORO		22.905.850	38,4	62,9	1,7
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	2.933.297	75,0	129,5	6,8
SS128	CENTRALE SARDA	1.185.938	67,5	202,4	0,0
SS130	IGLESIENTE	8.618.031	27,8	44,1	2,3
SS131	CARLO FELICE	45.170.815	16,4	23,5	1,3
SS195	SULCITANA	283.295	141,2	211,8	0,0
SS196	DI VILLACIDRO	6.390.725	40,7	81,4	3,1
SS197	DI SAN GAVINO E DEL FLUM	971.903	102,9	288,1	0,0
SS198	DI SEUI E LANUSEI	114.361	174,9	174,9	0,0
SS293	DI GIBA	1.343.987	74,4	133,9	0,0
SS387	DEL GERREI	260.938	76,6	153,3	0,0
SS466	DI SIBIOLA	744.825	107,4	134,3	0,0
SS547	DI GUASILA	494.553	161,8	161,8	0,0
PROVINCIA DI SUD SARDEGNA		68.512.668	28,9	48,8	1,8
SS130	IGLESIENTE	4.597.605	100,1	152,3	0,0
SS131	CARLO FELICE	9.278.872	15,1	19,4	0,0
SS131dir	CARLO FELICE	1.942.329	72,1	154,5	0,0
SS195	SULCITANA	8.694.598	62,1	101,2	9,2
SS196	DI VILLACIDRO	581.011	34,4	68,8	0,0
SS387	DEL GERREI	692.421	57,8	57,8	0,0
SS391	DI ELMAS	7.627	2622,4	2622,4	0,0
SS554	CAGLIARITANA	6.568.200	103,5	194,9	0,0
CITTA' METROPOLITANA DI CAGLIARI		32.362.662	61,2	103,2	3,7
TOTALE		258.681.070	33,2	55,1	1,7

Source : Traitement META

Tableau 11. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - accidents impliquant des camions

³ En considérant ces valeurs, il faut toutefois tenir compte du fait que l'estimation du volume de trafic lourd se réfère uniquement aux mouvements effectués par les véhicules *commerciaux*, tandis qu'elle exclut ceux effectués par les véhicules d'exploitation (véhicules d'entretien des routes, véhicules de ramassage des ordures, etc.), qui ne peuvent pas être retracés dans la matrice origine/destination, mais qui, de toute façon, constituent vraisemblablement une composante importante du flux sur les artères à moindre trafic.

3.5. Calcul de la probabilité d'accident pour la Région de Sardaigne

La probabilité globale d'un accident impliquant un camion-citerne cryogénique a été calculée sur la base des statistiques des accidents de la route des cinq dernières années, présentées dans les paragraphes précédents, en pondérant les données relatives aux événements impliquant des véhicules lourds avec celles relatives au nombre total d'accidents.

En particulier, pour chaque arc, les éléments suivants ont été pris en compte :

- le nombre total d'accidents N_T
- le nombre total d'accidents impliquant des véhicules lourds N_P .

et les indices ont été déterminés :

- du nombre total d'accidents $i_T = N_T / 100 \text{ Mvkm totaux}$
- d'accidents lourds : $i_P = N_P / 100 \text{ Mvkm lourds}$
- se réfère à une seule année⁴.

Pour pallier le fait que de nombreuses routes sont pratiquement dépourvues de trafic lourd (du moins simulé par le modèle), l'indice d'accident moyen pondéré a été utilisé comme indicateur de la probabilité de l'accident :

$$i = i_P + (1 - i_T)$$

avec α en première approximation égal à 0,1.

Cet indice représente la probabilité qu'un événement accidentel impliquant un camion-citerne cryogénique se produise, pour chaque 100 Mvkm de trafic généré par les camions-citernes eux-mêmes, avec les réserves suivantes

- a) en l'absence de données géoréférencées exactes concernant la localisation des événements accidentels individuels, le calcul a été effectué en supposant comme unité minimale de référence, pour les routes nationales, la combinaison entre le code administratif (par exemple SS131) et la municipalité où l'accident s'est produit, tandis que pour le reste du réseau, il a été fait référence aux valeurs accidentelles résiduelles moyennes, détectées au niveau municipal, liées aux volumes de trafic simulés sur le reste du réseau ;
- b) afin d'éviter les situations (occasionnelles) caractérisées par une absence totale d'accidents - souvent associées à des artères et/ou des districts territoriaux caractérisés par des niveaux de trafic très modestes, on a supposé un seuil de risque minimum égal au taux d'accident moyen de la province de référence sur le réseau local (excluant donc les routes nationales).

Il ressort de la littérature scientifique sur le sujet que l'estimation des dommages doit également être stratifiée en fonction de l'événement accidentel examiné : par exemple, une explosion est susceptible d'impliquer la population vivant à proximité, tandis qu'un renversement avec déversement de matériaux peut avoir un impact plus important sur les zones de valeur

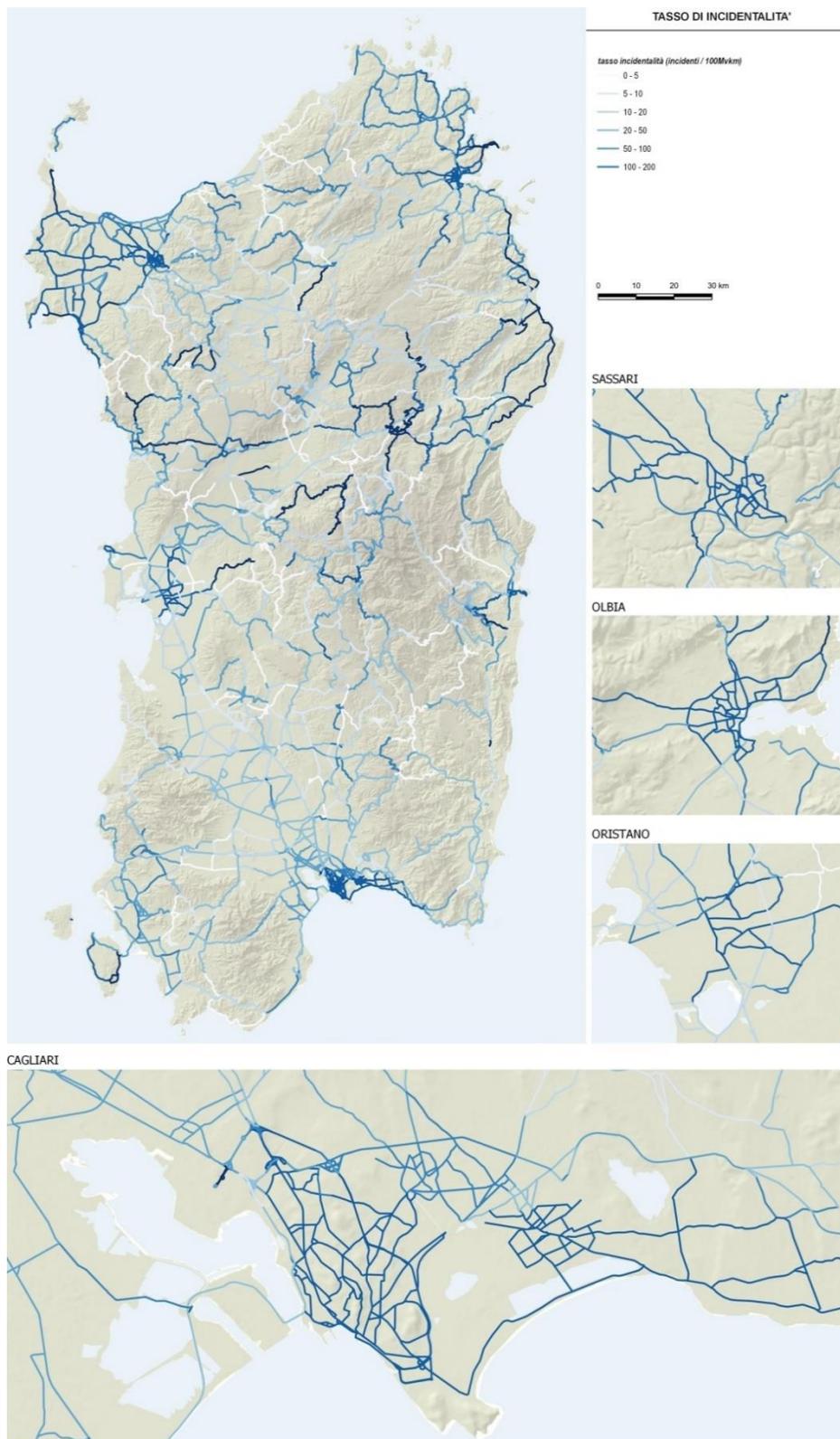
⁴ En d'autres termes, la valeur cumulée des accidents survenus au cours des cinq années 2014-2018 a été comparée à un volume de trafic égal à cinq fois la valeur annuelle moyenne résultant des simulations effectuées.

environnementale. En l'absence d'éléments spécifiques permettant de répartir la probabilité d'un accident entre les différents types de risques possibles, nous avons opéré, en première approximation, sans introduire de distinction entre les différents événements.

Dans Figure 8 cartographiquement.

Il en résulte une répartition des risques sur l'ensemble du territoire. Si, d'une part, les arcs routiers à risque moyen-haut sont concentrés près des principaux nœuds urbains et le long de certaines portions du littoral, d'autre part, les arcs les plus fréquentés, surtout la SS131, sont plutôt sûrs.

Cela est dû en grande partie aux normes de sécurité du système routier supra-municipal, qui semble pouvoir supporter facilement l'éventuelle charge supplémentaire de véhicules pour le ravitaillement en GNL. Il semble plutôt nécessaire d'analyser en détail le contexte d'origine-destination de ce que l'on appelle le dernier kilomètre, qui, longeant les arcs routiers à l'intérieur de contextes urbains et/ou locaux, devra être défini avec une attention particulière.



Source : Traitement META
 Figure 8. Estimation de la probabilité d'un accident

4. Calcul de l'indicateur de dommages potentiels

4.1. Généralités

En plus de considérer les taux d'accidents, c'est-à-dire la probabilité qu'un événement accidentel se produise, la construction du coefficient de risque doit tenir compte des dommages possibles associés à l'événement : par exemple, c'est une chose d'avoir un accident dans un tunnel à fort trafic, tout autre chose de l'avoir en pleine campagne sur des routes à faible trafic ; c'en est une autre d'avoir un accident dans une zone rurale, tout autre dans une zone urbaine à forte densité de population.

Pour ce faire, compte tenu des points précédents, la procédure de calcul de l'indicateur de dommages potentiels prend en compte trois facteurs distincts

- la présence d'un trafic léger, c'est-à-dire la possibilité qu'un événement accidentel affecte **les personnes se trouvant sur d'autres véhicules en transit.**
- la **population résidente autour de l'axe routier**, potentiellement exposée aux risques de l'accident
- d'autres éléments liés à la **vulnérabilité environnementale** du contexte.

4.2. Personnes dans d'autres véhicules en transit

La présence de personnes sur d'autres véhicules en transit est facilement déduite des mêmes simulations de trafic : étant donné t_{inc} la durée d'un accident, la probabilité que dans cet intervalle de temps le transit d'un autre véhicule se produise est simplement donnée par.

$$p_{tr} = (F_A + F_B) \frac{t_{inc}}{T_{oss}}$$

où F_A et F_B sont les flux de trafic estimés sur l'arc (exprimés par exemple en véhicules/jour), et T_{oss} le temps d'observation correspondant (dans ce cas, un jour).

Le nombre de personnes susceptibles de passer sur la route lors de l'événement accidentel peut donc être déterminé en multipliant la probabilité de passage par le coefficient d'occupation moyen des véhicules.

Évidemment, cette façon de procéder permet de déterminer la probabilité moyenne quotidienne que, lors de l'événement accidentel, le transit d'un certain nombre de personnes se produise. Il est également possible de supposer, d'une part, que les mouvements de camions-citernes se produisent à des heures de la journée caractérisées par une moindre présence de trafic et, d'autre part, que des systèmes d'alarme efficaces permettent de limiter la durée critique de l'événement uniquement aux phases précédant le démarrage de ces systèmes, avec la possibilité conséquente de bloquer la circulation sur l'axe routier examiné.

En première approximation, on a supposé un coefficient d'occupation égal à 1,2 personne/véhicule léger et 1,0 personne/véhicule lourd, tandis que la durée critique de l'événement accidentel a été fixée à 30 secondes.

4. Population exposée autour de l'axe routier

Chaque arche routière est entourée d'une certaine zone tampon définie de résidents et d'employés qui, en cas d'accident, pourraient être partiellement affectés par ses effets.

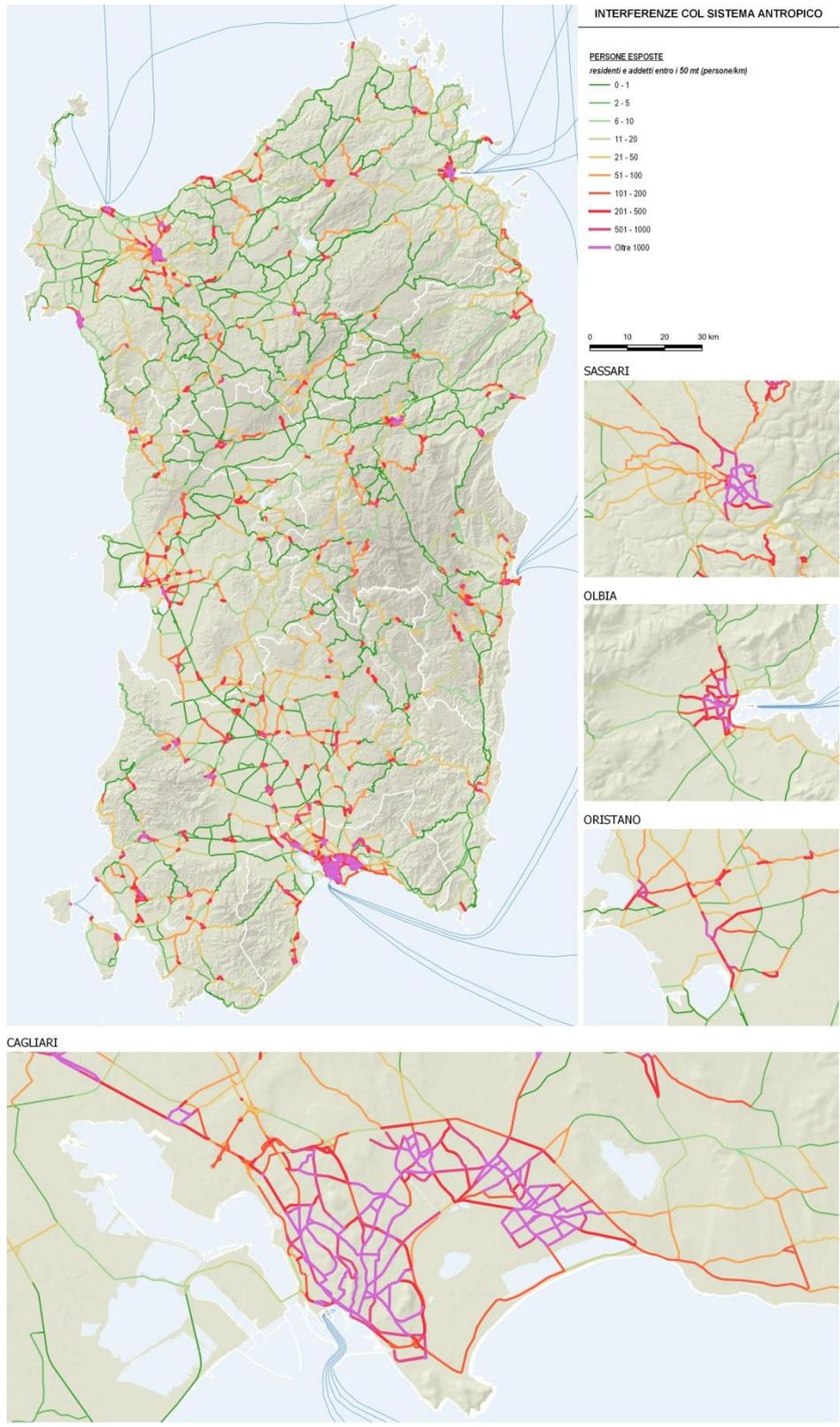
Sans entrer dans le détail des cas individuels, on peut se référer à tous les accidents avec déversement de liquides et/ou de gaz qui, selon le cas, peuvent se répandre dans l'air sur une certaine distance autour du lieu de l'accident.

Par conséquent, un indicateur de la population exposée a été défini en se référant à la présence de résidents et d'employés (données ISTAT pour la section de recensement) dans un buffer de 50 mètres de l'arc routier considéré comme défini a priori comme une valeur de référence pour une simulation maximale.

Cela permet, comme le définit l'image suivante, de mettre en évidence les arcs routiers sur lesquels la population exposée est plus importante, qui, comme il est évident, sont surtout concentrés dans les zones urbaines des principales villes sardes (Figure 9).

Alors que, d'une part, la criticité de la traversée des centres urbains, en particulier pour les véhicules transportant des marchandises, est bien connue, non seulement pour une question de risque réel, mais aussi pour une question de risque perçu, ainsi que pour l'influence sur le trafic local, l'indicateur met en évidence comment même le réseau principal, principalement concentré sur les infrastructures suburbaines, traverse quelques petites concentrations de population exposée, à prendre en compte dans le scénario du mouvement du GNL.

En effet, bien qu'il n'y ait pas de valeurs supérieures à 100 personnes exposées dans des contextes suburbains, il y a souvent des cas où, même pour de courtes distances, l'axe routier voit la présence de plus de 500 personnes dans le *buffer* considéré comme référence.



Source : Traitement META
 Figure 9. Identification de la population exposée

4.4. Éléments de vulnérabilité environnementale

Outre l'exposition au risque des personnes, l'exposition au risque de l'environnement a également été prise en compte.

Pour ce faire, un facteur de vulnérabilité environnementale a été pris en compte, en considérant les territoires vulnérables comme ceux traversés par des arcs routiers.

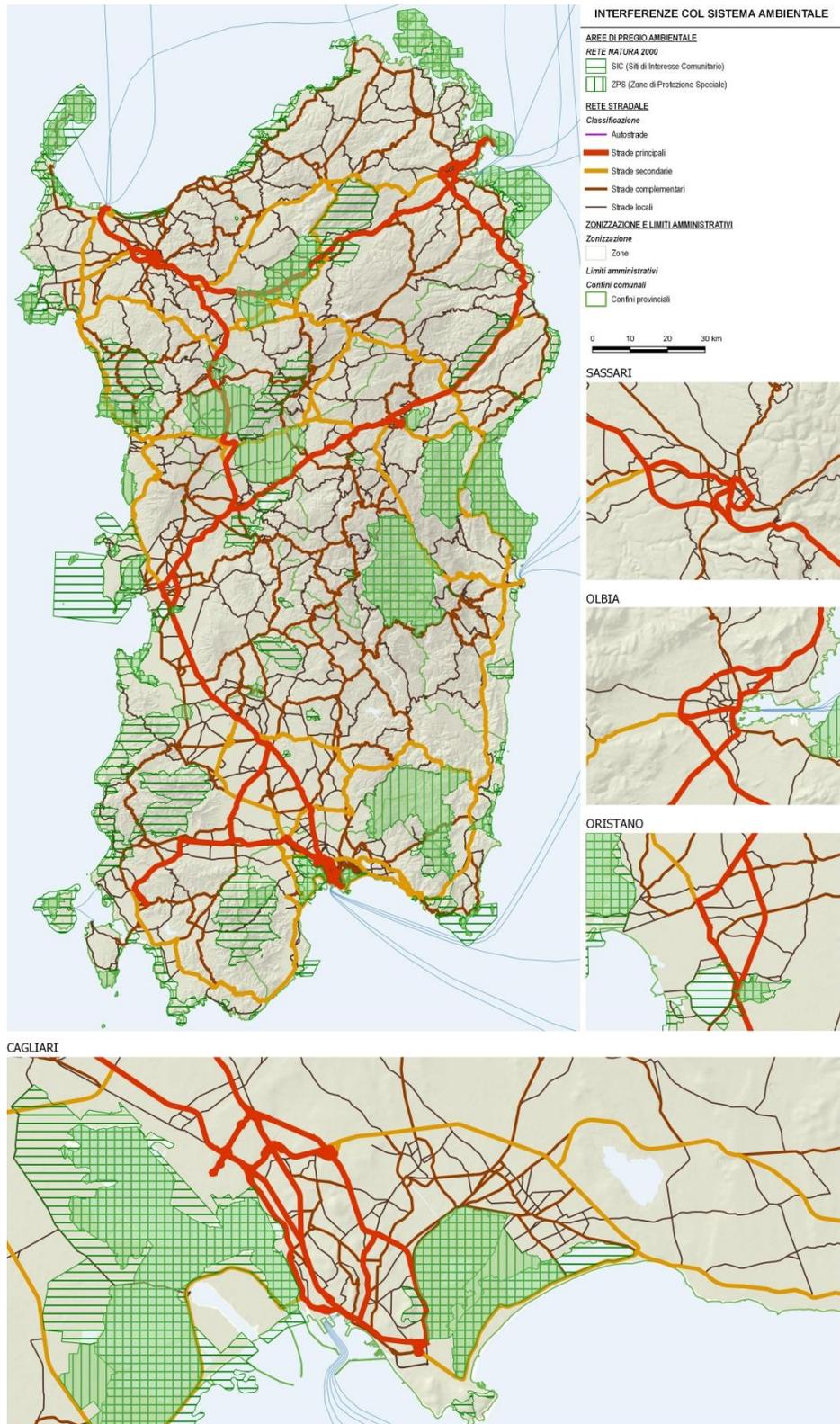
Cet indicateur présuppose une cartographie des zones de valeur environnementale, où les effets des accidents avec propagation de liquide et/ou de gaz pourraient affecter les caractéristiques naturelles des environs.

Sans préjudice de la possibilité de disposer de données plus détaillées, nous avons d'abord considéré les sites du réseau Natura2000 comme un système coordonné et cohérent (un réseau) de zones (sites d'importance communautaire SCI et zones de protection spéciale SPA) pour la conservation de la diversité biologique sur le territoire de l'Union européenne (Figure 10).

Comme on peut le voir sur l'image suivante, une grande partie des infrastructures extra-urbaines sont manifestement concentrées en dehors des zones naturelles. Cependant, ce n'est pas le cas dans tous les cas, car il est possible de remarquer que certaines des routes principales traversent également des zones protégées d'importance communautaire.

Cela se produit notamment dans certains cas dans le quadrant nord du territoire régional, où les liaisons à grande vitesse Sassari-Olbia, Nuoro-Olbia, Oristano-Sassari traversent des SIC et des ZPS respectivement définis.

Il convient également de mentionner certaines zones affectées par la sortie des points d'origine du GNL dans le port d'Oristano.



Source : Traitement META

Figure 10. Identification des vulnérabilités environnementales

4.5. Calcul de l'indicateur de dommages potentiels et résumé des résultats

Un résumé des résultats obtenus, en termes d'exposition au risque sur chaque route nationale, est présenté dans le Tableau 12.

Ces valeurs sont présentées sous une forme agrégée par province et unité administrative de réseau, mais sont en fait déterminées au niveau d'un seul arc routier, donnant lieu à une "carte des dommages potentiels" en cas d'accident impliquant un camion-citerne cryogénique (Figure 11).

A cette fin, il faut d'abord estimer, à partir du nombre de personnes impliquées, le nombre potentiel de blessés et de morts suite à l'accident, sur la base des indicateurs de blessure et de létalité, calculés au niveau d'un seul arc à partir des données d'accident analysées au paragraphe 0.

Après avoir estimé les blessures et les décès, il est possible de calculer l'indicateur de dommages potentiels sur la base de la formulation suivante:

$$D_p = F_p * V_F + M_p * V_M + AP_p * V_{AP}$$

Où F_p , M_p , AP_p correspondent respectivement au nombre de blessés, de morts et à l'extension des zones de valeur environnementale (en hectares) potentiellement impliquées dans le cas d'un accident, tandis que V_F , V_M et V_{AP} correspondent à leurs valeurs économiques, estimées à partir de la littérature.

En particulier, les valeurs suivantes peuvent être supposées pour l'Italie (Commission européenne 2019) :

- Décès : 3,2 millions d'euros;
- Blessures graves : 0,5 million d'euros;
- Blessure légère : 0,04 million d'euros;
- Plaie légère : 0,04 million d'euros;

COD	NOME STRADA	flussi veicolari leggeri	interferenza siti Rete Natura 2000	popolazione esposta
		legg/km/ giorno	km	persone
NSA167	DI ITTIRI	3.928	0	49
NSA319	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	987	0	97
NSA325	SCALA RUIA - TEMPIO	21.781	0	3
SS125	ORIENTALE SARDA	137.729	0	3.386
SS127	SETTENTRIONALE SARDA	156.539	0	4.331
SS127bis	SETTENTRIONALE SARDA	3.379	0	311
SS128bis	CENTRALE SARDA	58.696	1	2.931
SS129	TRASVERSALE SARDA	108.725	0	0
SS131	CARLO FELICE	468.451	7	612
SS131bis	CARLO FELICE	72.508	0	131
SS131dir-centr	NUORESE	32.643	0	34
SS132	DI OZIERI	6.001	21	772
SS133	DI PALAU	52.417	0	613
SS133bis	DI PALAU	7.915	0	377
SS134	DI CASTEL SARDO	3.979	0	2.066
SS199	DI MONTI	38	0	166
SS200	DELL'ANGLONA	43.639	0	1.532
SS291	DELLA NURRA	32.184	0	67
SS291dir	DEL CALIK	2.878	1	24
SS291var	DELLA NURRA	84.398	0	221
SS291var-a	DELLA NURRA	44	0	5
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	179.182	13	872
SS292dir	NORD OCCIDENTALE SARDA	117.013	0	600
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	3.705	0	1.175
SS389dir-a	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	1.005	0	124
SS392	DEL LAGO DEL COGHINAS	1.016	10	512
SS427	DELLA GALLURA CENTRALE	3.755	0	1.598
SS597	DI LOGUDORO	35.418	24	20
SS672	SASSARI - TEMPIO	31.725	0	0
SS729	SASSARI - OLBIA	84.348	18	127
PROVINCIA DI SASSARI		1.756.028	96	22.755
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	52.587	0	1.363
SS128	CENTRALE SARDA	979	0	522
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	10.615	0	589
SS131	CARLO FELICE	303.557	1	213
SS131dir-centr	NUORESE	76.064	1	135
SS292	NORD OCCIDENTALE SARDA	370.890	0	3.006
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	42.054	0	1.714
SS442	DI LACONI E DI URAS	28.916	0	811
PROVINCIA DI ORISTANO		885.661	2	8.352
EX SS125	ORIENTALE SARDA	193.362	0	1.632
EX SS131	CARLO FELICE	4.600	0	108
EX SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	108.854	0	580
SS125	ORIENTALE SARDA	225.238	5	4.068
SS125dir	ORIENTALE SARDA	47.795	0	2.199
SS125var	NUOVA SS125	19.481	0	50
SS128	CENTRALE SARDA	34.490	0	4.537
SS129	TRASVERSALE SARDA	495.515	14	1.795
SS129bis	TRASVERSALE SARDA	52.929	0	261
SS131	CARLO FELICE	225.991	6	36
SS131dir-centr	NUORESE	287.857	2	295
SS198	DI SEUI E LANUSEI	80.089	0	2.975
SS295	DI ARITZO	75.609	0	1.566
SS388	DEL TIRSO E DEL MANDROLISAI	303.694	0	419
SS389	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	671.341	0	628
SS389dir-b	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	11.273	0	1.145
SS389var	DI BUDDUSO' E DEL CORREBOI	25.131	17	8
SS390	DI BARI SARDO	1.779	0	1.873
SS537	DI GHILARZA	117	0	482
PROVINCIA DI NUORO		2.865.146	44	24.656
EX SS125	ORIENTALE SARDA	145.332	3	1.937
EX SS128	CENTRALE SARDA	108.797	0	1.281
SS125	ORIENTALE SARDA	225.237	0	0
SS125var	NUOVA SS125	24.204	1	17
SS126	SUD OCCIDENTALE SARDA	774.418	10	3.593
SS126dir	SUD OCCIDENTALE SARDA	3.290	0	257
SS128	CENTRALE SARDA	1.276.624	0	1.814
SS130	IGLESIENTE	171.691	0	88
SS130dir	IGLESIENTE	435.932	0	1.078
SS131	CARLO FELICE	978.194	0	380
SS195	SULCITANA	393.754	0	2.706
SS196	DI VILLACIDRO	324.700	0	555
SS196dir	DI VILLACIDRO	160.395	0	2.883
SS197	DI SAN GAVINO E DEL FLUMINI	208.336	0	1.772
SS198	DI SEUI E LANUSEI	7.159	1	645
SS293	DI GIBA	172.488	1	1.740
SS387	DEL GERREI	754.316	5	1.702
SS466	DI SIBIOLA	69.787	0	29
SS547	DI GUASILA	50.843	0	2.000
PROVINCIA DI SUD SARDEGNA		6.285.496	21	24.476
EX SS554	CAGLIARITANA	58.148	0	361
N SS129	CENTRALE SARDA	19.490	0	92
NSA371	EX S.S. N. 125 ORIENTALE SARD/	267.097	0	15
SS125var	NUOVA SS125	415.350	4	8
SS130	IGLESIENTE	1.494.256	0	1.566
SS130dir	IGLESIENTE	9.095	0	41
SS131	CARLO FELICE	1.436.800	0	293
SS131dir	CARLO FELICE	3.484.798	0	934
SS195	SULCITANA	304.597	8	2.029
SS195racc	VIA S. PAOLO	1.134.829	0	530
SS196	DI VILLACIDRO	4.128.716	0	44
SS387	DEL GERREI	346.094	0	84
SS391	DI ELMAS	0	0	368
SS554	CAGLIARITANA	2.641.317	0	3.053
CITTA' METROPOLITANA DI CAGLIARI		15.740.587	12	9.418
TOTALE		27.532.918	174	89.658

Source : Traitement META

Tableau 12. Exposition au risque routier accidentel

Ne distinguant pas les données ISTAT utilisées de la nature des blessures, seule la valeur de la blessure légère a été considérée dans la présente élaboration.

Par exemple, si la population actuelle est de 40 personnes, la probabilité de décès et de blessure est respectivement de 10 % et de 100 %, alors que la valeur de la vie humaine est de 3,2 millions d'euros et celle de la blessure de 40 000 euros, le dommage potentiel peut être déterminé comme suit:

$$D = 40 \times (0,10 \times 3\,200\,000 + 0,90 \times 40\,000) = 40 \times (320\,000 + 36\,000) = 356\,000 \text{ €}$$

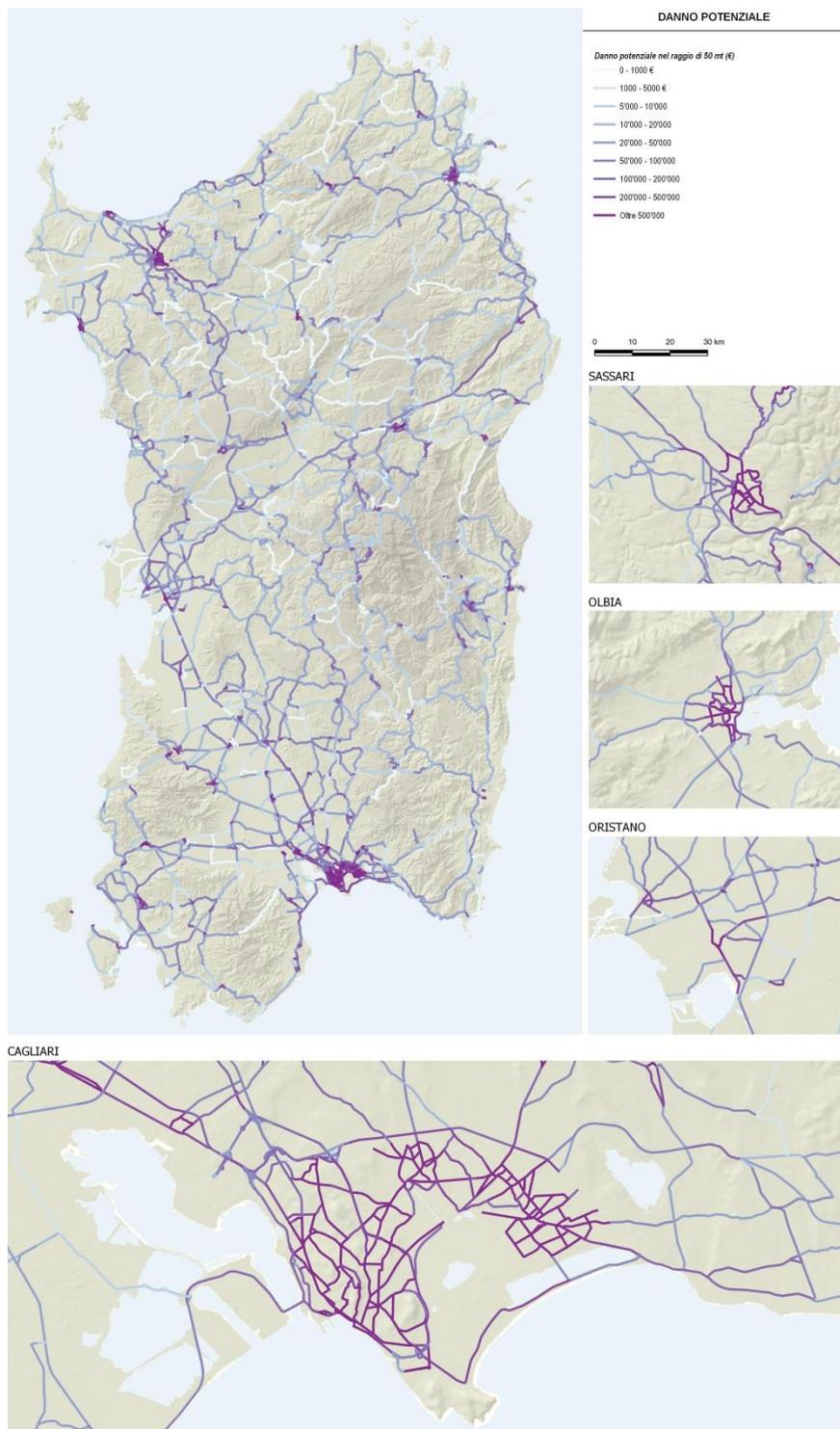
En supposant un indice d'accident total de 10 événements tous les 100 Mvkm, le coefficient de risque est le suivant:

$$10 / 100 \text{ Mvkm} \times 356.000 \text{ €} = 10 \times 0.36 / 100 \text{ €/vkm} = 0.036 \text{ €/vkm}$$

qui est un facteur de coût kilométrique qui peut être utilisé dans la mission.

En revanche, en ce qui concerne les zones de valeur environnementale, on suppose une valeur de référence moyenne pour les sites Natura 2000 d'environ 3 mille €/ha (dix Brink *et coll.*, 2011).

Après avoir déterminé ces valeurs au niveau d'un seul arc, il est possible de produire une «carte des dommages potentiels» en cas d'accident impliquant un camion-citerne cryogénique (Figure 11). Cela met une nouvelle fois en évidence les centres urbains, où se concentre naturellement la population résidente et active, mais aussi le réseau routier principal, où les flux de véhicules sont plus importants. En revanche, les domaines de valeur environnementale apparaissent dans une moindre mesure, en raison de la forte asymétrie entre la valeur économique qui leur est associée et celle liée à la blessure ou au décès d'une personne.



Source : Traitement META

Figure 11. Carte des dommages potentiels liés aux arcs routiers

5. Identification des routes à moindre risque

5.1. Coefficient de risque global

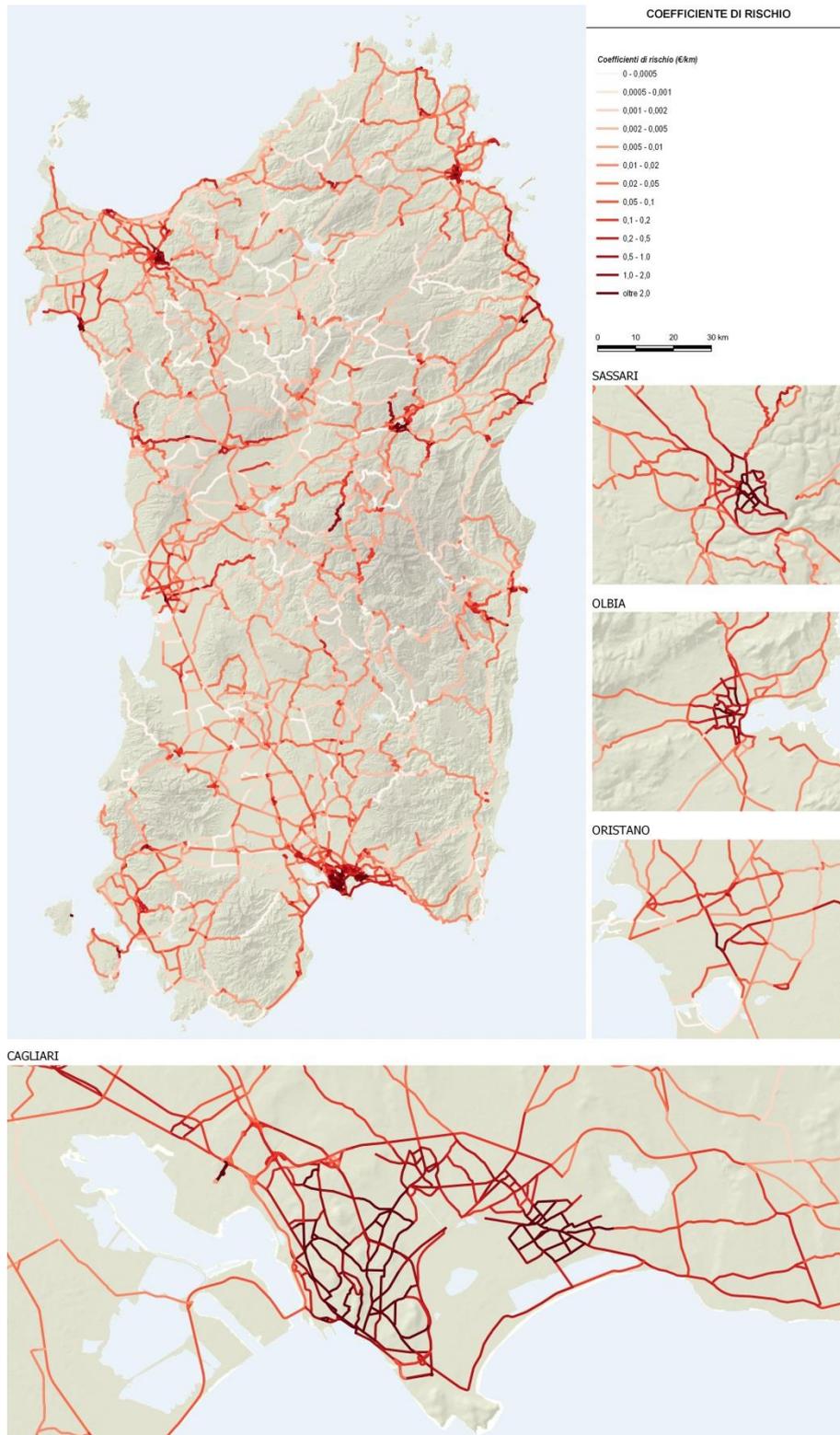
Après l'analyse de l'accidentologie (point 4), qui a permis d'estimer la probabilité d'un accident, et l'estimation des dommages potentiels (point 5), il est donc possible de procéder au calcul du coefficient de risque global, selon les méthodes décrites au point 3 et résumées dans la formule synthétique suivante.

$$\text{Coefficient de risque} = \text{probabilité de l'accident} \times \text{dommages potentiels}$$

Ce coefficient, exprimé en unités monétaires pour 100 millions de véhicules-km sur le réseau (€/100 Mvkm), est l'expression synthétique du "coût social" associé à la circulation des camions-citernes cryogéniques sur le réseau routier sarde.

La représentation cartographique du coefficient de risque (Figure 12), possible grâce au fait que les deux facteurs ont été calculés au niveau d'un seul arc, montre que les valeurs les plus élevées (>1 €/km) sont concentrées dans les zones urbaines, où tant la probabilité d'un accident que les dommages potentiels sont élevés. À l'extrême opposé, on trouve (quelques) groupes d'arcs caractérisés par des valeurs très faibles (<0,001 €/km), attribuables davantage à des dommages potentiels très faibles qu'à des valeurs de probabilité d'accident faibles.

Au milieu se trouve la majorité du réseau routier principal et secondaire de la région, avec des situations très différenciées se référant également à la même infrastructure routière (observez par exemple le Carlo Felice), sur la base des flux présents, du contexte traversé et de la qualité de l'infrastructure routière elle-même (et donc de la probabilité d'accident).



Source : Traitement META

Figure 12. Carte du coefficient de risque associé au transit d'un camion-citerne cryogénique

5.2. Minimisation des risques et itinéraires routiers

L'individuation des itinéraires routiers avec le risque social le plus bas est effectuée au moyen d'un algorithme simple de recherche du coût minimum (Dijkstra), alimenté par

- un premier ensemble d'un ou plusieurs points d'origine i (les ports de débarquement du GNL) ;
- un deuxième ensemble de points de destination j (les points du réseau) ;
- un réseau routier valorisé avec les coefficients de risque calculés selon les méthodes décrites au paragraphe précédent.

L'ensemble des arcs assignés fournira une image des routes à risque minimum sur le réseau routier sarde, par rapport à la configuration proposée du réseau de distribution de GNL.

Par rapport à ce résultat, d'autres éléments doivent cependant être pris en compte, notamment les deux suivants :

- la configuration du réseau routier sarde, telle qu'elle ne permet pas de remplacer facilement certains axes routiers qui, surtout pour le trafic lourd, constituent la seule alternative facilement praticable ;
- l'identification, au sein de chaque zone de trafic, des choix d'itinéraires du "dernier kilomètre" qui, difficiles à définir à l'échelle de la présente étude, devront être envisagés en fonction des décisions prises quant au type de distributeurs.

En plus de l'identification de l'itinéraire le moins coûteux, un deuxième résultat important consiste dans le **coût social cumulé** qui lui est associé, selon la formulation suivante:

$$CS_p = N \sum_k CS_{ij}$$

Où :

- CS_p est le coût social associé à l'ensemble de l'itinéraire, exprimé en €/an ;
- N est le nombre de camions-citernes par an, calculé sur la base de la demande annuelle de GNL de chaque point du réseau et en supposant une capacité de 20 tonnes pour chaque véhicule ;
- CS_{ij} est le coût social associé à chaque arc individuel qui compose l'itinéraire ;

Grâce à cet indicateur, il devient donc possible

- comparer différents lieux d'origine (ports) afin d'identifier le lieu optimal pour desservir une destination spécifique (point de réseau) ;
- comparer différentes structures de réseau. En effet, en additionnant tous les coûts sociaux de tous les itinéraires considérés dans une configuration particulière (par exemple : utilisation du port A ou du port B), on obtient une estimation de son coût social global.

Dans les paragraphes suivants, deux hypothèses différentes seront analysées :

- la disponibilité d'un seul point d'entrée (modèle SOMD), identifié dans le port d'Oristano ;
- la disponibilité de points d'entrée multiples (modèle MOMD).

5.3. Affectation des réseaux : cas d'une origine unique

Dans cette première hypothèse, les itinéraires les moins risqués sont identifiés à partir d'un point d'origine unique. En particulier, le port de Santa Giusta à Oristano est utilisé.

La Figure 13 montre cartographiquement les routes sélectionnées, représentant par l'épaisseur de l'arc, le nombre de méthaniers associés.

Une fois sortis du port, les flux ont tendance à se répartir de manière similaire entre les directions nord et sud.

Les flux en direction du sud utilisent d'abord la route de Carlo Felice, puis la quittent à Sanluri, et continuent vers le sud par des routes moins urbanisées, et donc moins coûteuses socialement. Après Siliqua, les flux se répartissent entre l'est (Cagliari) et l'ouest (Portovesme), en continuant à privilégier le réseau local.

Quant aux flux dirigés vers le nord, ils ont tendance à ne pas utiliser le Carlo Felice, qui passe près de la zone urbaine d'Oristano, et préfèrent le réseau local le long de la vallée de Tirso. Une fois entré dans la province de Sassari, les deux composantes principales se séparent, continuant distinctement vers Olbia et Sassari.

Il est possible d'effectuer la même élaboration également pour les ports de Porto Torres (Figure 14), Golfo Aranci (Figure 15), Porto Vesme (Figure 16) et Cagliari (Figure 17), en calculant pour chacun le coût social global relatif (Tableau 13.).

PORTO	costo sociale €/anno
Porto Torres	7.485
Golfo Aranci	10.430
Oristano S.ta Giusta	4.488
Porto Vesme	6.338
Cagliari	8.133

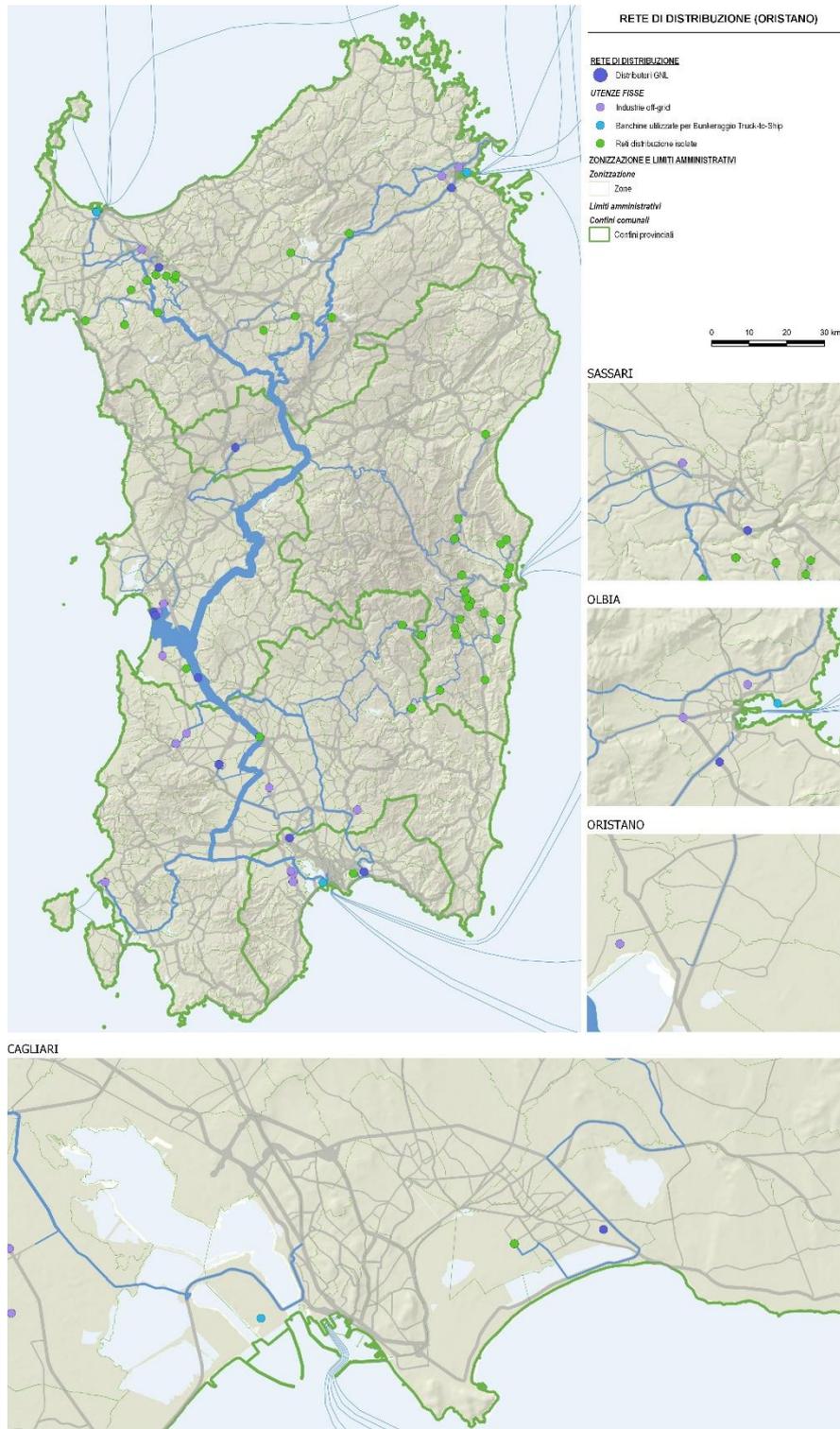
Source : Traitement META

Tableau 13. Itinéraires par route nationale

La comparaison des différents coûts sociaux montre que le port d'Oristano Santa Giusta est le choix ayant le plus faible impact social, suivi de Porto Vesme, Porto Torres et Cagliari. Golfo

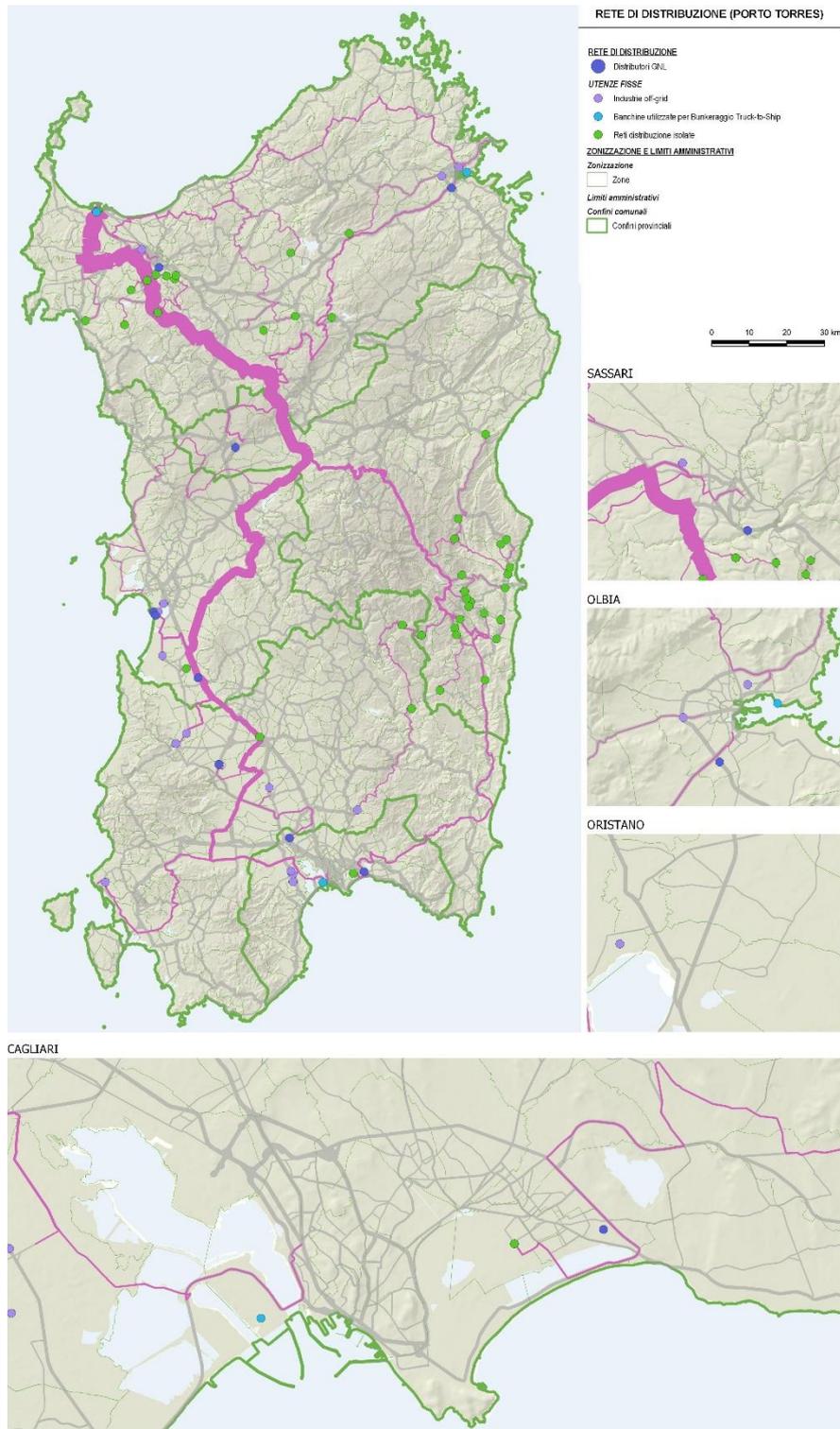
Aranci est pénalisé par un taux d'accidents particulièrement élevé lié aux routes SP16 et SP82, qui constituent en même temps un passage obligé pour quitter le port. ⁵

⁵ Cette valeur peut également être le résultat d'une sous-estimation des flux de véhicules sur ces infrastructures, à son tour en raison du manque de données de validation dans la zone calibrée du modèle.



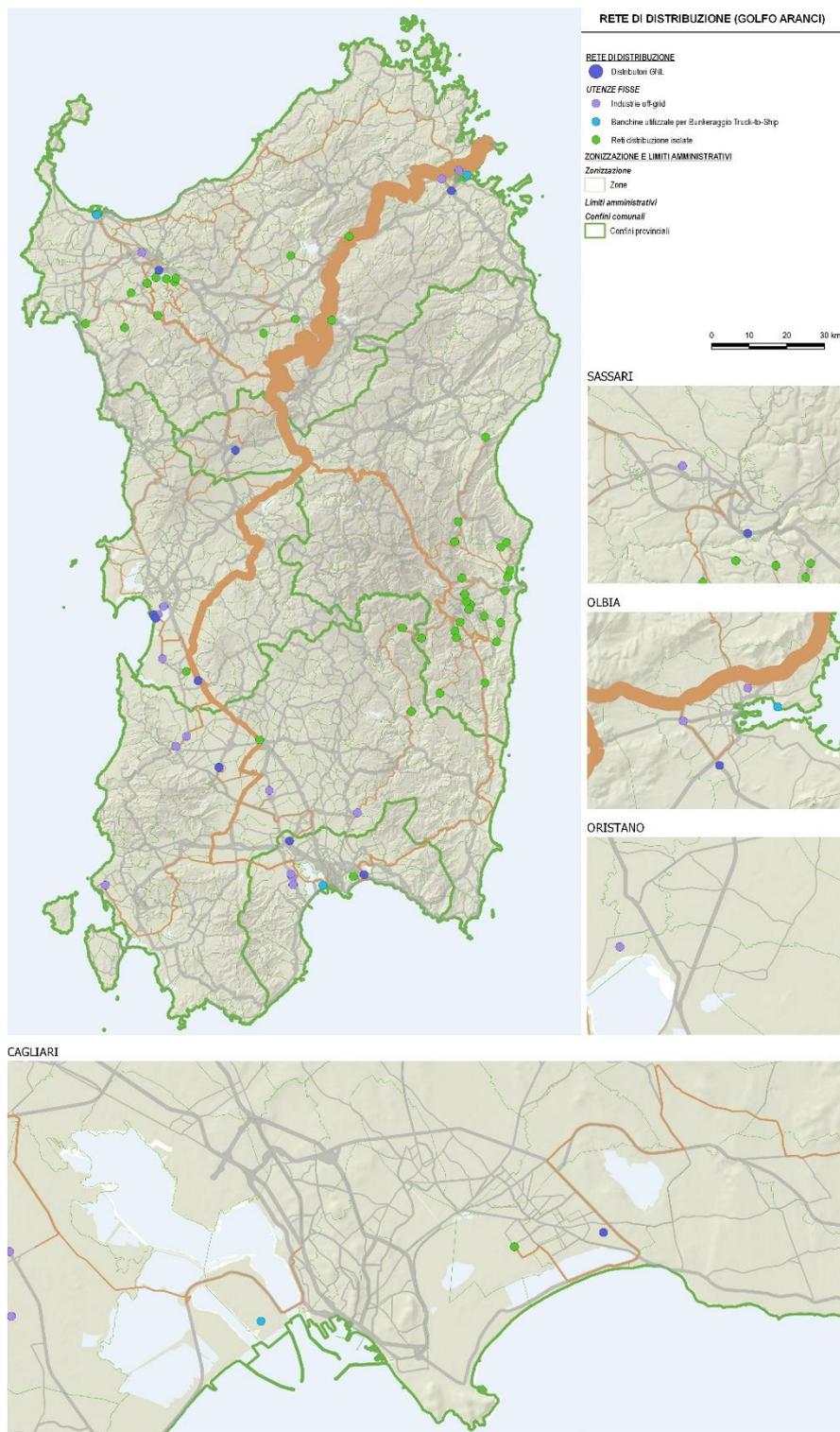
Source : Traitement META

Figure 13. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port d'Oristano



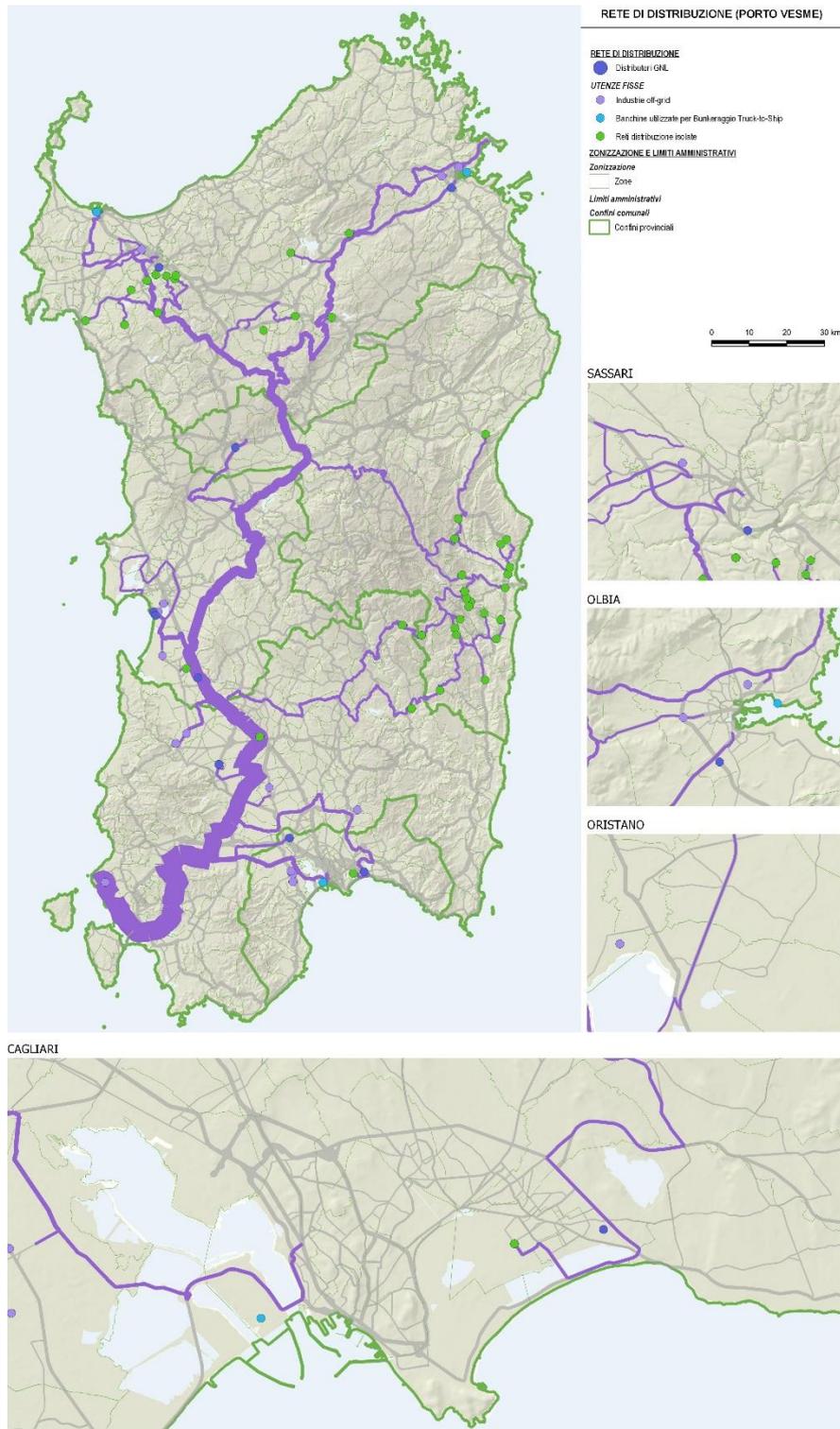
Source : Traitement META

Figure 14. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Porto Torres



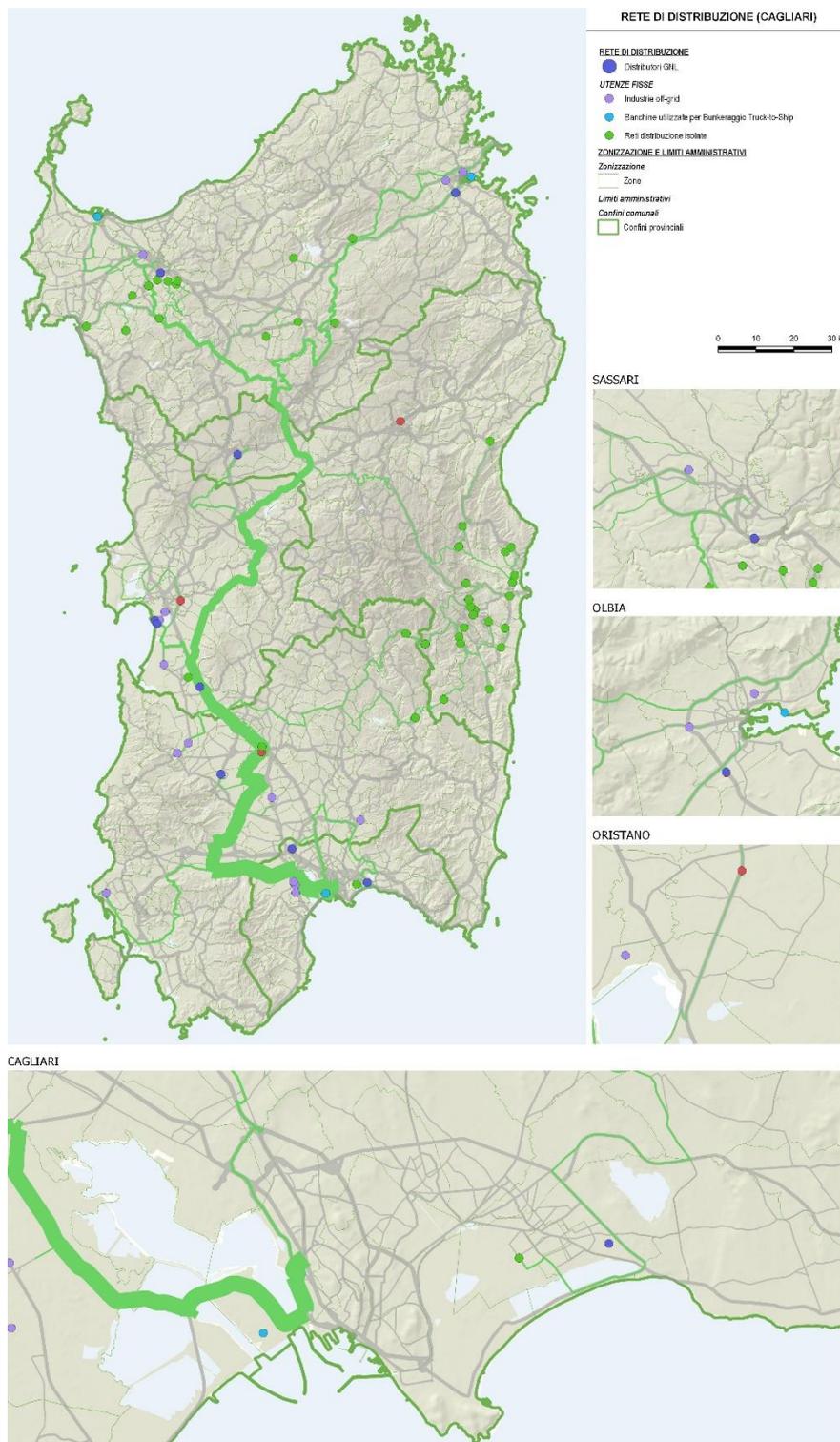
Source : Traitement META

Figure 15. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port d'Olbia



Source : Traitement META

Figure 16 Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Portovesme.



Source : Traitement META

Figure 17. Attribution des mouvements de pétroliers sur les routes à risque minimal à partir du port de Cagliari

5.4. Affectation au réseau : cas d'un plus grand nombre de lieux d'origine

Dans cette deuxième hypothèse, on évalue la disponibilité simultanée de tous les lieux d'origine vus dans le paragraphe précédent. Par conséquent, pour chaque destination, seule l'origine qui peut être atteinte par la route ayant le coût social le plus bas est sélectionnée.

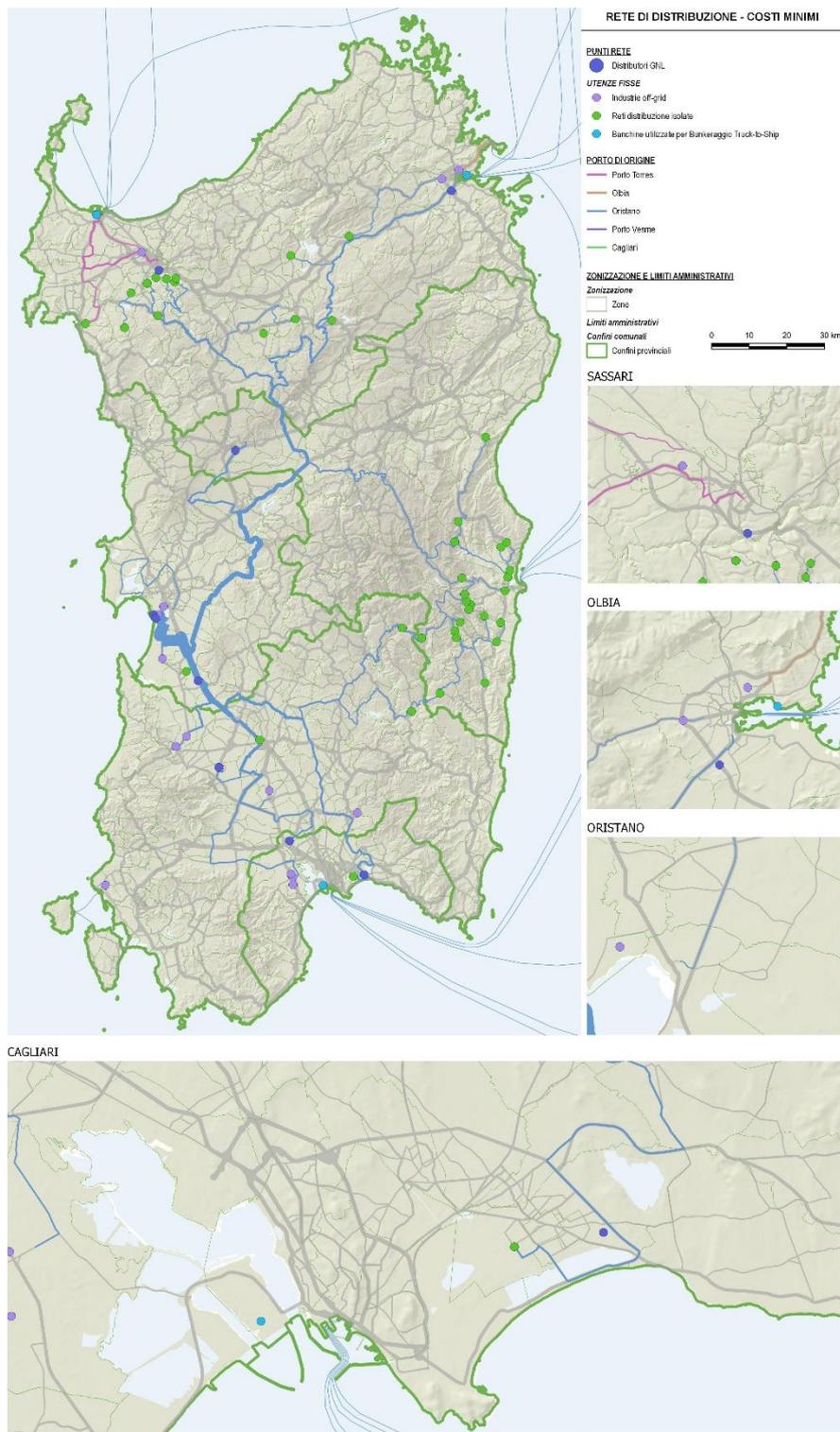
Les résultats de cette opération sont présentés dans la figure 18. Comme on peut l'imaginer, le port d'Oristano Santa Giusta reste le port de référence pour la plupart des destinations.

Les seules exceptions constatées concernent le territoire à l'ouest de Sassari, qui finit par relever de Porto Torres. Des effets similaires ne se produisent pas dans les trois autres ports, pour des raisons différentes :

- Le port de Cagliari étant très proche de la ville, les dégâts potentiels sont particulièrement élevés ;
- Portovesme n'a pas de destinations intérieures d'intérêt sur lesquelles il serait avantageux par rapport à Oristano ;
- Golfo Aranci, comme on l'a déjà vu dans le paragraphe précédent, est plutôt pénalisé par des taux d'accidents élevés sur les deux routes d'accès au port.

Dans ces cas, les seules destinations avantageuses sont celles qui se trouvent à proximité immédiate du port (ou à l'intérieur du port), comme les quais utilisés pour le soutage *truck to ship*.

Globalement, le coût social total associé à cette dernière hypothèse est de **3'784 € /an**, soit 20% de moins que le scénario basé exclusivement sur le port d'Oristano. Cette économie semble être principalement associée aux transits évités dans la zone urbaine de Sassari, étant donné la disponibilité d'un lieu d'origine à Porto Torres.



Source : Traitement META

Figure 18. Répartition des mouvements des pétroliers sur les routes à risque absolu minimum

6. Observations finales

Ce rapport a illustré les résultats finaux des élaborations relatives à l'identification des routes à risque minimum pour la distribution du GNL en Sardaigne, définies en référence au scénario de pénétration de base.

La méthodologie adoptée, qui reproduit fidèlement celle déjà décrite dans le rapport T3.4, est divisée en étapes fondamentales suivantes

- vérification de la configuration du réseau de distribution de GNL sur l'île, par rapport aux initiatives en cours, ainsi que des considérations théoriques relatives à la répartition optimale des points du réseau dédiés à la vente de carburant de transport, et détermination conséquente de la matrice origine/destination (O/D) des mouvements annuels des navires cryogéniques dans les situations SOMD (*single origin multiple destination*, où le seul point de déchargement est le port d'Oristano) et MOMD (multiple origin multiple destination, où les ports de Porto Torres, Golfo Aranci, Portovesme et Cagliari sont ajoutés) ;
- analyse des données d'accidents sur le réseau routier sarde, avec estimation de la probabilité d'un accident impliquant un camion-citerne cryogénique
- estimation des dommages potentiels liés à un tel accident, en se référant aux conséquences sur la population humaine (occupants des véhicules en transit et riverains de la route) et sur l'environnement naturel (zones incluses dans le réseau Natura 2000) ;
- calcul, comme produit des deux facteurs précédents, du risque social associé au transit d'un camion-citerne cryogénique sur chaque arc du réseau routier sarde ;
- l'identification des itinéraires à risque social minimal, et la détermination des coûts correspondants, dans les différentes configurations de réseau envisagées.

Le résultat obtenu confirme le bien-fondé du choix du port d'Oristano qui, en plus d'être dans une position assez barycentrique par rapport aux lieux de consommation, a aussi une viabilité d'accès qui permet d'éviter le transit à l'intérieur de la zone urbaine correspondante. Moins efficace, pour des raisons qui varient de temps en temps, est l'utilisation des escales de Golfo Aranci, Portovesme ou Cagliari, qui sont parfois pénalisées par une position excentrique par rapport à la géographie de la consommation prévue, et parfois par des problèmes d'accidents et/ou un nombre élevé de personnes exposées sur les routes d'accès. Le cas de Porto Torres apparaît un peu différent, représentant la solution d'un risque social plus faible pour les points du réseau situés dans le quadrant extrême nord-ouest de l'île, atteignables depuis Oristano uniquement en touchant la zone urbaine de Sassari. L'utilisation de cette deuxième escale permettrait de réduire d'environ 20% le risque social lié à la circulation des navires cryogéniques.

Toutefois, dans la perspective du développement pratique du schéma aval de GNL pour la Sardaigne, il est souhaitable que les résultats résumés ici soient bien pondérés en fonction de considérations de nature différente, comme par exemple

- l'importance des coûts d'exploitation normaux du trafic de camions-citernes (coûts de la main-d'œuvre, consommation, amortissement des véhicules) qui, selon les différentes conditions de trafic, peuvent prendre des valeurs comprises entre 1 et 2 €/véhicule-km, donc plusieurs ordres de grandeur supérieurs à la valeur unitaire du risque social⁶ ;
- l'ampleur des coûts de construction et de gestion d'un second point d'atterrissage, comparée à une économie sur le risque social, estimée à quelques centaines de €/an.

Néanmoins, la méthodologie utilisée ici a le mérite de permettre une vérification «fine» des coûts sociaux associés à la traversée de sections particulièrement sensibles, par exemple urbaines, mettant en évidence l'importance, dans la recherche de la meilleure solution, des conditions liées au dernier kilomètre. Ce problème finit d'ailleurs par être lié à la question de la sécurité des opérations de chargement/déchargement dans les dépôts.

La méthodologie ainsi testée a un caractère général, et est donc également applicable à des cas similaires, comme mieux détaillé dans les rapports T3.6 et T3.7.

⁶ Si l'on rapporte l'estimation monétaire du risque social (4 358 €/an) au volume total du trafic lourd (294 millions de véhicules-km/an), on obtient une valeur unitaire d'environ 1 500 €/100 millions de véhicules-km, soit 15 millièmes d'€/véhicule-km.

7. Bibliographie et sitographie

- Bonvicini S., Leonelli P., Spadoni G., 1998, "Risk analysis of hazardous materials transportation: evaluating uncertainty by means of fuzzy logic", Journal of Hazardous Materials, 62; 59-74.
- Borghetti F., Gandini P., Studer L., Todeschini V., Pastorelli G., 2015, "I SIIG per la mappatura del rischio associato al trasporto di sostanze pericolose: applicazione in aree vulnerabili del contesto lombardo," Convegno ASITA 2015, 167-174, ISBN/ISSN: 978-88-941232-2-7
- European Commission, *Handbook on external cost of transport* – January 2019 – V1.1
- Frank W.C., Thill J.-C., Batta R., 2000, "Spatial decision support system for hazardous material truck routing", Transportation Research C, 337-359.
- Gandini P., Borghetti F., Studer L., Iuliano R., Pastorelli G., 2015, "Assessment of areas exposed to damage by dangerous goods transportation. Application of Analytic Hierarchy Process method for land covers weighting", IEEE - ITSC 2015 Smart Mobility for Safety and Sustainability, ISBN: 978-1-4673-6595-6.
- Leonelli P., Bonvicini S., Spadoni G., 2000, "Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology", Journal of Hazardous Materials, 71; 283-300.
- Liu L., 2017, "Study on Route Optimization of Methanol Safety Transportation Routing"; Chemical Engineering Transactions, vol.59; pp.1177-1182.
- Orso Giacone M., Bratta F., Gandini P., Studer L., 2012, "Dangerous goods transportation by road: a risk analysis model and a global integrated information system to monitor hazardous materials land transportation in order to protect territory, Chemical Engineering Transactions", vol. 26-2012, Cisap 5th International Conference on Safety & Environment in Process & Power Industry, ISSN: 1974-9791.
- Studer L., Gandini P., Borghetti F., Maja R., Todeschini V., 2012, "Improving knowledge of risk in Dangerous Goods Transport", XIX ITS World Congress, Vienna, Paper EU-00685.
- Studer L., Gandini P., Iuliano R., Borghetti F., Marchionni G., 2018, "Road users exposed to Harm from Transportation of dangerous goods – definition and estimation", Chemical Engineering Transactions, 67, 757-762 DOI: 10.3303/CET1867127
- Ten Brink P., Badura T., Bassi S., Daly, E., Dickie, I., Ding H., Gantioler S., Gerdes, H., Kettunen M., Lago, M., Lang, S., Markandya A., Nunes P.A.L.D., Pieterse, M., Rayment M., Tinch R., (2011). Estimating the Overall Economic Value of the Benefits provided by the Natura 2000 Network. Final Report to the European Commission, DG Environment on Contract ENV.B.2/SER/2008/0038. Institute for European Environmental Policy / GHK / Ecologic, Brussels 2011
- Wang H., Xiao G., Wei Z., 2013, "Optimizing Route for Hazardous Materials Logistics Based on Hybrid Ant Colony Algorithm", Discrete Dynamics in Nature and Society, ID752830



LOT n°6 : PLAN DU RESEAU DE DISTRIBUTION ET DE TRANSPORT DU GNL
SUR LE TERRITOIRE DE LA REGION PROVENCE ALPES COTE D'AZUR

Projet GNL SIGNAL



Phase V - Définition du modèle de réseau de
distribution GNL
Livrable T 3.5.1

Mai 2020



Sommaire

1. Préambule	3
2. Situation actuelle de distribution du GNL en région PACA.....	4
3. Les perspectives à l’amont.....	5
3.1 Les terminaux méthaniers	5
3.2 La Biométhanisation comme source de Biométhane liquéfié	7
4. Les perspectives par usage	9
4.1 L’approvisionnement îlien	10
4.2 Les solutions mobiles de production d’électricité pour les navires à quai.....	10
4.3 Le GNL carburant routier	11
4.4 Le GNL carburant maritime.....	13
4.5 Le GNL carburant fluvial.....	15
4.6 Le GNL carburant ferroviaire.....	16
4.7 Les usages domestiques du GNL.....	18
4.8 Les usages industriels du GNL.....	19
5. Analyse comparative des scénarios bas et haut	19
6. Conclusion	22

Table des illustrations

Figure 1: schéma théorique de distribution du GNL	4
Figure 2 : carte du réseau de distribution GNL en 2019	5
Figure 3 : évolution de la production et de la demande de GNL de 2000 à 2050 (source IHS)	6
Figure 4 : évolution du nombre de camions-citernes GNL chargé annuellement de 2014 à 2019 (source Elengy)	6
Figure 5 : potentiel de production de méthane issu de l'agriculture (TWhnPCS) en 2050, par région (source Ademe)	7
Figure 6 : Potentiel départemental de production de biodéchets à l'horizon 2050 (hors déchets issus industrie	

de l'agro-alimentaire) (source : ADEME)	8
Figure 7 : carte des sites de méthanisation en PACA en 2020	9
Figure 8 : carte des sites biométhanés raccordés au réseau de GRTgaz en 2020	9
Figure 9 : solution mobile d'Air Flow	11
Figure 10 : la barge multifonction de Sofresid	11
Figure 11: activité du transport routier en PACA (ORT - ADEME 2018)	11
Figure 12 : carte schématique des plateformes logistiques en PACA	12
Figure 13 : photo d'une station mobile GNL développée par HAM	12
Figure 14 : projection jusqu'en 2050 du mix carburant maritime (DNG VL 2019)	14
Figure 15 16 : le réseau fluvial de Provence-Alpes-Côte d'Azur	15
Figure 16 : carte des circulations d'engins Diesel sur le réseau ferré (source : SNCF Réseau)	16
Figure 17 8 : photo de la station de Molveno	17
Figure 18 : carte du réseau de GrDF en région PACA (zones violettes)	18
Figure 19 : projection hypothétique sur 10 ans du scénario pessimiste	19
Figure 20 : projection hypothétique sur 10 ans du scénario optimiste	Erreur ! Signet non défini.
Figure 21 : projection hypothétique sur 10 ans du scénario optimiste	20
Figure 22 : volumes des scénarios pessimistes et optimistes à 2030	20
Figure 23 : graphique représentant les volumes des scénarios pessimistes et optimistes en Ktpa	21
Figure 24 - Foncier logistique et transport 2001-2010 (source : http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr)	22
Figure 25 : Schéma cible de transport et distribution du GNL en PACA : potentiels de développement pour les usages portuaires et maritimes du GNL	23
Figure 26 : Schéma cible de transport et distribution du GNL en PACA : potentiels de développement pour les usages terrestres du GNL : carburant, clients industriels, clients domestiques	24

1. Préambule

Objectif :

Définir 2 schémas possibles du futur réseau de distribution de GNL en PACA qui soient en cohérence avec les schémas des territoires de la zone de coopération.

Afin de définir des scénarios pour la région PACA, il faut considérer d'une part les sources d'approvisionnement en GNL pour la région, d'autre part les usages possibles du GNL et leur potentiel de développement respectif. Le schéma ci-dessous décrit ces différentes composantes de la chaîne GNL.

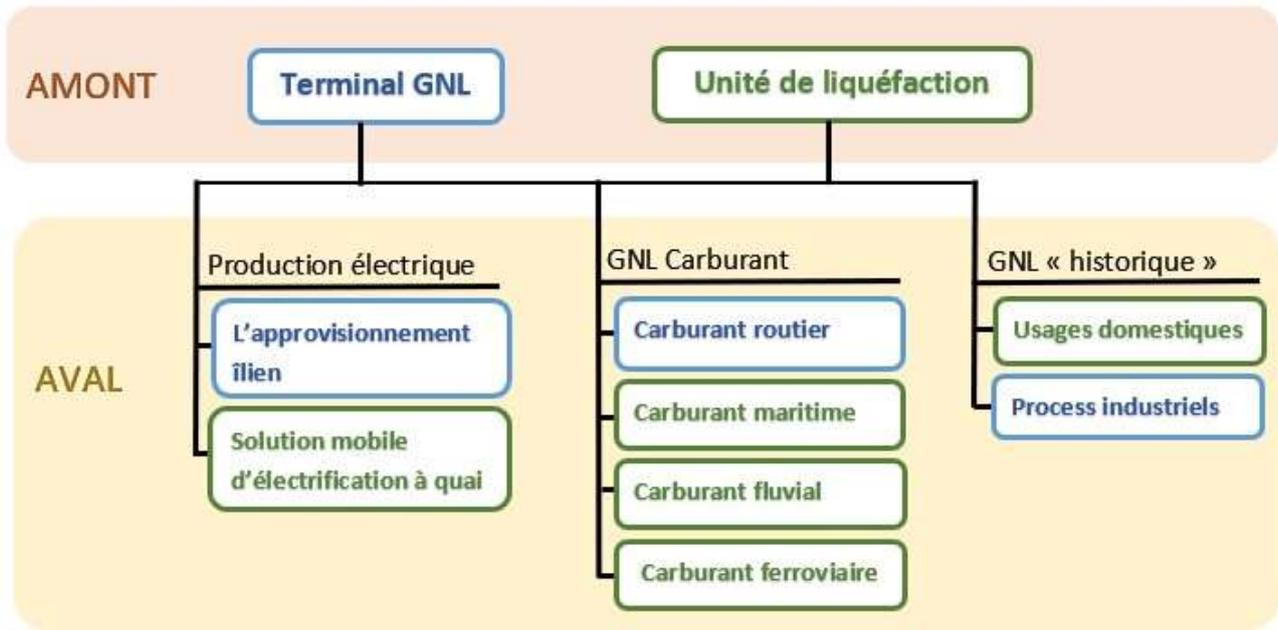


Figure 1: schéma théorique de distribution du GNL

A travers l'analyse de chacune de ces composantes, il est possible de définir deux scénarios bas/haut du réseau de distribution sur les dix prochaines années. Chacune d'entre elles, pour des raisons différentes, possède des incertitudes de projection qui sont estimées en volume dans ce rapport. Ces projections sont ainsi décrites pour tenter de définir la manière dont le réseau de distribution va se développer dans la région PACA et illustrées par une carte en conclusion.

2. Situation actuelle de distribution du GNL en région PACA

Le GNL qui arrive en région PACA transite pour l'essentiel par les terminaux méthaniers de Fos sur Mer : Fos Tonkin et Fos Cavaou. Il a été acheminé par navires méthaniers de grande capacité (de l'ordre de 150 000 m³ de GNL par cargaison) depuis des usines de liquéfaction de gaz naturel situées dans d'autres pays.

Une fois déchargé, il est stocké dans les cuves du terminal. La majeure partie est ensuite regazéifiée¹ puis injectée dans le réseau de transport national de gaz naturel. C'est la fonction traditionnelle d'un terminal méthanier.

Une petite partie des volumes reste à l'état liquide et est consommée localement :

- par des clients industriels ou des sites consommateurs de gaz naturel non raccordés au réseau de gaz naturel,
- par des stations-services GNV, - par des navires fonctionnant au GNL.

Ce sont les usages GNL dits « small scale » (par opposition aux usages « large scale » précédemment mentionnés), terme utilisé pour désigner les volumes qui sortent du terminal méthanier à l'état liquide pour les besoins de consommation de l'hinterland du terminal.

¹ Une part des volumes réceptionnés est réexpédiée sur navires méthaniers vers d'autres destinations mieux valorisées (environ 7% des volumes déchargés en 2019).

Actuellement, l'acheminement du GNL small scale depuis le terminal vers les points de consommation se fait exclusivement par camions citernes. En 2019, sur les 82.2 TWh de gaz naturels reçus dans les terminaux de Fos, les usages small scale ont représenté 1.8 TWh (l'équivalent de 6359 citernes) soit l'équivalent d'un peu moins de 2 cargaisons standard.



Figure 2 : carte du réseau de distribution GNL en 2019

Des détails sont disponibles dans les rapports de phases I et IV.

3. Les perspectives à l'amont

L'approvisionnement en GNL de la région PACA se caractérise par :

- Une forte sécurité d'approvisionnement : la présence de deux terminaux méthaniers à Fos sur Mer est un atout pour la région. Le GNL est une ressource abondante à l'échelle mondiale et ceux-ci sont bien positionnés pour recevoir un approvisionnement pérenne à un prix compétitif dans les années (voire décennies) à venir. Les volumes reçus seront très largement supérieurs en volume aux besoins des usages small scale.
- Une offre small scale caractérisée en forte croissance, qui devient multimodale avec, à plus long terme, des perspectives de « verdissement ».
- L'apparition aux côtés des terminaux méthaniers, d'une offre bioGNL locale limitée mais qui pourrait également se développer à moyen terme.

3.1 Les terminaux méthaniers

Le gaz naturel est présent en quantité abondante à l'échelle mondiale et le consensus des analystes est aujourd'hui que l'offre de GNL sera largement suffisante pour répondre à la demande à l'horizon 2050. Cidessous à titre d'exemple les scénarios d'offre et de demande de IHS :

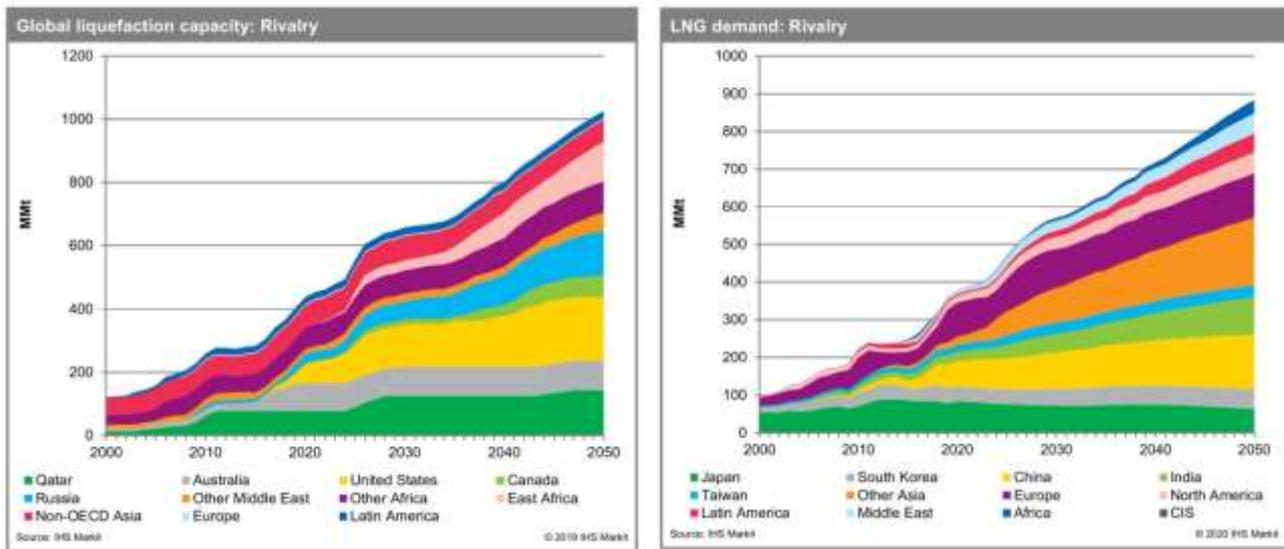


Figure 3 : évolution de la production et de la demande de GNL de 2000 à 2050 (source IHS)

Au sein du marché mondial, les terminaux méthaniers de Fos jouissent d’une position favorable, puisqu’ils sont d’une part situés à proximité de sources importantes de production de GNL (Algérie, Nigéria), d’autre part parce qu’ils sont les premiers terminaux depuis le Canal de Suez connectés aux places de marché gazières liquides et profondes d’Europe occidentale, ce qui renforce leur attractivité. Le taux d’utilisation des terminaux de Fos sur Mer est ainsi l’un des plus élevés d’Europe. En bref, il n’y a pas de risques d’une pénurie de GNL à l’amont de la chaîne, les flux continueront d’arriver à Fos qui restera naturellement le point d’alimentation en GNL pour la région PACA, pour les décennies à venir.

Une offre de service small scale en pleine évolution :

Depuis l’émergence des besoins small scale et la mise en service du service de chargement de camions citernes à Fos Tonkin en 2014, la demande small scale à Fos n’a cessé de croître :

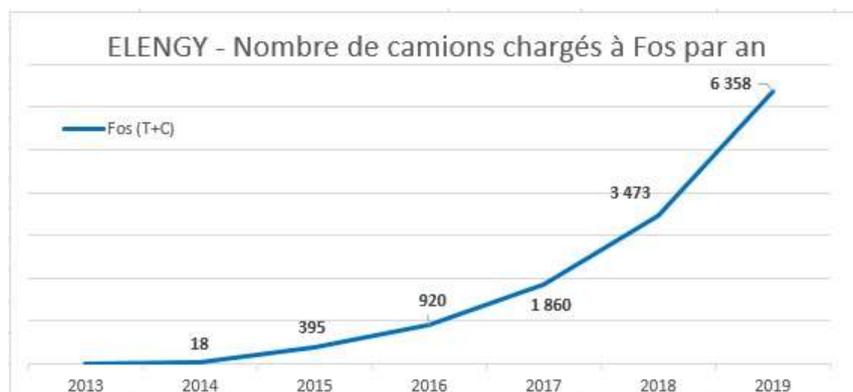


Figure 4 : évolution du nombre de camions-citernes GNL chargé annuellement de 2014 à 2019 (source Elengy)

Les terminaux de Fos s’adaptent en permanence pour répondre à la croissance et à l’évolution des besoins, comme en témoigne les augmentations de capacité successives des stations de chargement à Fos Tonkin ou, en 2019, l’installation de 2 baies de chargement citernes à Fos Cavaou. Aux côtés du chargement de GNL par camions citernes, le chargement de GNL par micro-méthaniers ou par barges est amené à se développer, pour les besoins du soutage ou l’approvisionnement ilien. Le service est désormais disponible sur les deux terminaux. De plus, l’augmentation des volumes et le développement de stockages satellites justifie dans un futur proche un transport massifié de GNL par voie ferroviaire : ELENGY développe un projet de chargement de GNL par train directement depuis le site de Fos Tonkin.

Enfin, l'offre GNL aux terminaux de Fos est amenée dans le futur à se verdir, soit à travers la production locale de biométhane liquéfié ou de méthane de synthèse, soit à travers son importation depuis des sites de production plus éloignés :

- S'agissant de production locale, on peut mentionner le projet pilote Jupiter 1000 qui constitue une première étape en ce sens. Ce projet, développé par GRTgaz et situé à proximité immédiate du terminal de Fos Tonkin, vise la conversion d'H₂ vert et de CO₂ produit sur la zone industrialo-portuaire de Fos pour créer du méthane de synthèse : il est prévu que ce méthane soit pour l'instant injecté dans le réseau de transport (à l'état gazeux), mais il serait envisageable de le liquéfier puis de le distribuer via les baies de chargement de camions citernes du terminal.
- Une autre piste est l'importation à grande échelle de biométhane liquéfié ou e-GNL produit par exemple dans des zones à fort potentiel. D'énergie de transition, le GNL deviendrait alors une énergie de destination, sans impact sur les usages finaux, le biométhane liquéfié étant parfaitement substituable au GNL d'origine fossile.

3.2 La Biométhanisation comme source de Biométhane liquéfié

Actuellement, il n'y a pas de projet « bioGNL » opérationnel² en France en l'absence de cadre réglementaire, car le rachat réglementé, qui favorise la création des sites de biométhane, est conditionné par son injection dans le réseau de transport ou de distribution à l'état gazeux. Les autres usages ne peuvent pas bénéficier du tarif de rachat et les producteurs ne sont donc pas incités à produire du biométhane liquéfié. Toutefois la situation est en train d'évoluer : la loi de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit un cadre pour la production de biométhane liquéfié, fixe l'objectif d'atteindre une part de 3% des poids lourds roulant au GNV (gaz naturel pour véhicules) et vise une part de 20% du bioGNV dans la consommation de GNV en 2023².

Si le potentiel pour la région PACA est limité concernant les ressources agricoles qui permettent de produire du biométhane (cf. Figure 5), le potentiel de la filière de production à partir de biodéchets est plus prometteur avec déjà plusieurs sites/projets dans la région (cf. Figure 6).

	CIMSE	Résidus de cultures	Déjections	Herbe	Total
Auvergne Rhône-Alpes	2,3	1,8	3,1	1,7	8,9
Bourgogne Franche-Comté	1,7	2,8	1,8	0,9	7,3
Bretagne	5,9	1,8	4,3	0,9	12,9
Centre Val de Loire	5,9	3,7	0,8	0,7	11,1
Corse	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Grand Est	3,8	5,2	2,4	1,4	12,8
Hauts-de-France	8,3	4,2	1,8	1,1	15,4
Ile-de-France	2,3	1,2	0,1	0,5	4,0
Normandie	4,7	2,4	2,5	1,0	10,6
Nouvelle Aquitaine	8,5	4,0	3,5	1,8	17,9
Occitanie	3,8	2,1	2,7	1,7	10,3
Provence-Alpes-Côte d'Azur	0,0	0,1	0,5	0,6	1,2
Pays-de-la-Loire	4,0	2,2	3,3	0,7	10,2
Total	51	31	27	13	123

Figure 5 : potentiel de production de méthane issu de l'agriculture (TWhnPCS) en 2050, par région (source Ademe)

² A l'exception de quelques projets de méthanisation qui passent par une étape intermédiaire de liquéfaction comme par exemple Methabrave.

² https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/sites/default/files/16064-1_PPE_light_0.pdf

Figure 12 – Potentiel départemental de production de biodéchets hors IAA, 2050

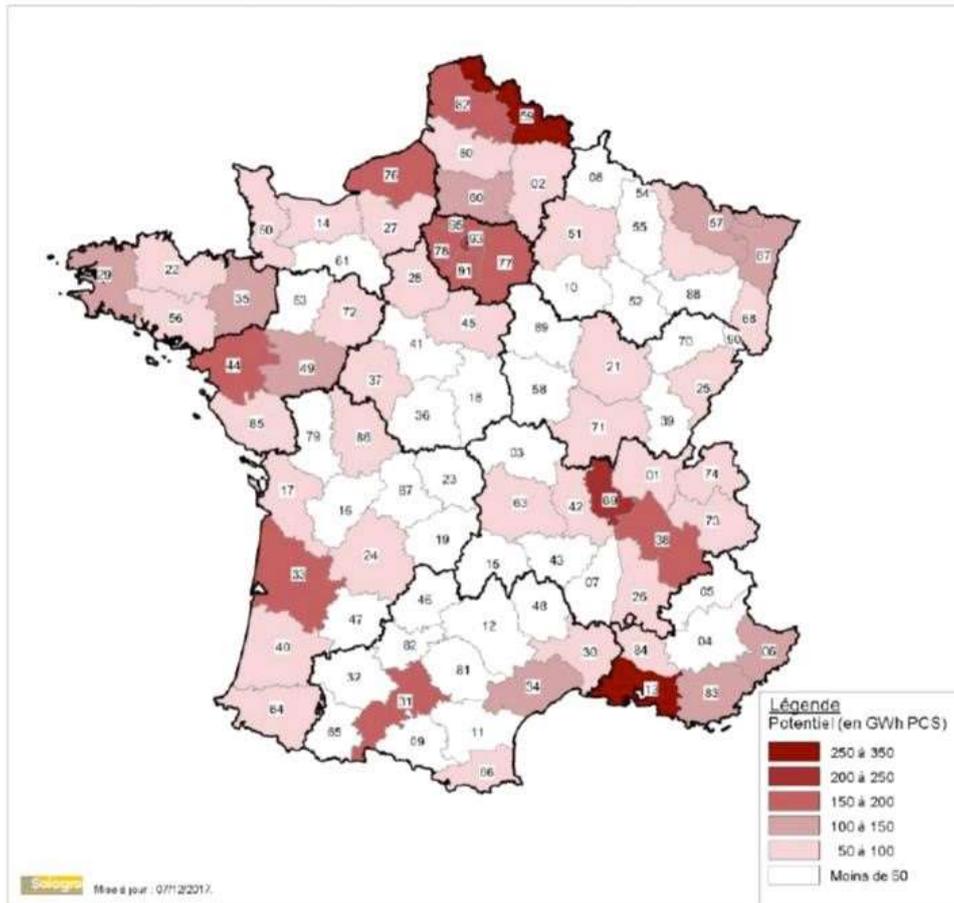


Figure 6 : Potentiel départemental de production de biodéchets à l'horizon 2050 (hors déchets issus industrie de l'agroalimentaire) (source : ADEME)

L'ONG GERES qui recense l'ensemble des sites de méthanisation en fonctionnement dans la région Provence Alpes Côte d'Azur³ en compte 47 en 2020 (cf. figure 7), dont 15 sites de méthanisation et 32 sites de gestion des déchets incluant les Stations d'Épuration des eaux usées (STEP) et les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). La grande majorité des sites est dédiée à la cogénération. Seulement 3 sont raccordés au réseau de GRTgaz⁴ (cf. figure 8), avec des tailles différentes de 9, 13 et 26 GWh par an (selon GRTgaz) soit respectivement 1 343, 1 941 et 3 882 m³ ou l'équivalent de 35, 51 et 102 citernes GNL. A noter que le plus gros site des trois n'est autre que la plus grosse centrale de biométhane de France : l'usine de traitement des boues de Sormiou, près de Marseille. Une partie des boues est traitée permet à la fois d'injecter du gaz sur le réseau pour alimenter 8 000 foyers, mais aussi d'alimenter en GNC 110 cars et bus de la région au quotidien.

³ Lien internet vers la carte : <http://www.portail-mo-paca.fr/cartographie/cartographie-centres-paca/>

⁴ Lien vers la carte : <http://www.grtgaz.com/solutions-avenir/grtgaz-solutions-davenir-pour-la-transition-energetique/lebiomethane-gaz-renouvelable/donnees-biomethane.html>



Figure 7 : carte des sites de méthanisation en PACA en 2020



Figure 8 : carte des sites biométhanés raccordés au réseau de GRTgaz en 2020

Pour passer du biogaz au biométhane, il y a une étape d'épuration du biogaz. Pour produire du Biométhane liquéfié, il faudra aussi équiper les sites de production de biométhane d'unités de micro-liquéfaction, ce qui entraîne une hausse du coût du projet comparé aux projets GNC (gaz naturel comprimé) qui ne nécessitent pas de cette étape supplémentaire. Le GNC a donc un avantage « coût de production ». Toutefois, tant que le prix du Biométhane liquéfié carburant reste inférieur au prix du diesel, la demande sur le segment poids lourd existera et il sera important d'observer l'évolution réglementaire future qui devrait asseoir ou non le développement de la filière.

Le développement de la production de biométhane liquéfié aura un impact limité sur le réseau de distribution de GNL en PACA : la production de ces sites devrait être exclusivement évacuée par camions citernes et pourrait par exemple venir alimenter des sites ou stations-services locales. Ceci serait de nature à créer quelques flux de citernes additionnels, mais les volumes devraient rester marginaux comparés à ceux issus des terminaux méthaniers, qui devraient rester la principale source d'approvisionnement en GNL de la région.

4. Les perspectives par usage

La consommation de GNL small scale dans la région PACA devrait connaître un développement significatif dans les prochaines années, en raison d'une part de la croissance de la demande pour les usages actuels, d'autre part du développement de nouveaux débouchés, comme le soutage maritime.

4.1 L'approvisionnement îlien

L'un des cas d'utilisations de GNL est l'approvisionnement (ou la production) dans des zones où le raccordement aux réseaux d'électricité et de gaz nationaux n'est pas possible. C'est typiquement le cas de certaines îles. La Corse par exemple, est une zone non interconnectée (ZNI) au réseau électrique continental. C'est aussi le premier territoire de France à s'être doté d'une programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), dès 2015 qui prévoit l'approvisionnement en gaz naturel de l'île et le besoin de sécuriser l'alimentation énergétique de la Corse. La PPE prévoit pour 2023, la conversion des deux centrales thermiques de la Corse (centrale de Lucciana au Nord-Est et d'Ajaccio au Sud-Est de l'île en centrale à cycle combiné gaz (CCG) d'une puissance d'environ de 250 MW fonctionnant au gaz naturel. Ce choix permet de répondre à la fois à un besoin de renouvellement de la centrale vieillissante d'Ajaccio fonctionnant actuellement au fioul lourd et aussi aux besoins de base et de pointe de l'île très tournée vers les énergies renouvelables. Le gaz nécessaire à l'alimentation de ces centrales y serait expédié sous forme de GNL depuis les terminaux de Fos. La PPE prévoit un volume estimé à 80 000 tonnes par an de GNL pour l'alimentation des deux centrales dès 2023. On mentionne ici ce débouché small scale conséquent des terminaux de Fos à titre d'information mais dans la mesure où la Corse ne fait pas partie du territoire régional, il n'est pas repris dans les scénarios. La Sardaigne disposera quant à elle d'un terminal de réception de GNL Small scale à l'horizon 2021, qui pourrait également être alimenté depuis les terminaux de Fos.

S'agissant des îles de la région PACA, il n'existe pas pour l'instant de chaînes de fourniture en énergie actives ou en projet basées sur le GNL.

4.2 Les solutions mobiles de production d'électricité pour les navires à quai

En 2020, 20 % de la population française est exposée à une pollution de l'air qui serait responsable de 67 000 décès prématurés en France⁵. Les populations des grands ports font parties des populations exposées à la pollution issue des fumées des paquebots et ferries à quai. La pollution de l'air est devenue est un enjeu sanitaire. La région PACA a lancé en 2019 un plan de 30 millions d'euros pour électrifier les quais de Marseille, Nice et Toulon, avec pour objectif la suppression à terme, de la totalité des émissions atmosphériques. Ces investissements porteront à la fois sur l'infrastructure du port (mise en place de transformateurs de voltage, de convertisseurs de fréquence Hertz et d'une armoire de distribution équipée des dispositifs de sécurité) mais aussi sur les navires.

Néanmoins, des solutions GNL mobiles peuvent intervenir dans la phase de transition ou si des raisons techniques venaient à empêcher l'intégralité de l'électrification des quais. La première de ces solutions est un dispositif de fourniture d'électricité GNL disposé à quai mise au point par la société Air Flow et qui nécessite peu d'espace à quai. Elle consiste à brûler le GNL d'une citerne dans des groupes électrogènes en passant par une étape de regazéification du GNL, puis de conversion de l'électricité au format attendu par le navire (cf. figure 9). Cette solution convient pour les ferries, à hauteur de 2 MW de puissance. Au-delà, pour les navires de croisière par exemple, cette puissance ne suffit pas, mais des solutions sont à l'étude comme la station flottante multi fonction développée par Sofresid : elles serait capable de fournir une puissance électrique de 20 MW (en plus de la conversion de la fréquence de 50Hz à 60Hz pour les navires) mais également d'assurer le soutage en GNL, le tri sélectif et la collecte des déchets du navire sans perturber les opérations commerciales de ce dernier (cf. figure 10).

⁵ Selon une étude européenne publiée dans la revue European Heart Journal (<https://academic.oup.com/eurheartj>)

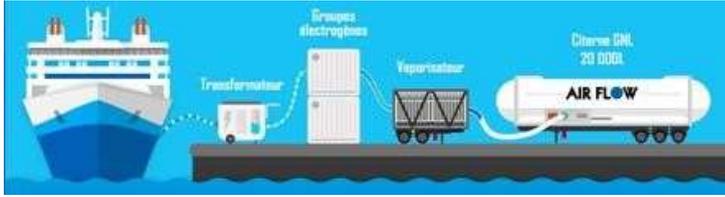


Figure 9 : solution mobile d'Air Flow



Figure 10 : la barge multifonction de Sofresid

Une alternative consiste à produire l'électricité à quai à partir d'hydrogène et d'une pile à combustible d'une puissance de 1 à 2 MW (pour laquelle une étude de la chambre de commerce du Var est en cours). Le coût et la mise en place d'une telle solution reste a priori significativement supérieur à celle des solutions GNL.

On peut imaginer un scénario bas à 0, où l'électrification se ferait soit par raccordement au réseau ENEDIS, soit via des solutions mobiles à l'hydrogène. Dans un scénario optimiste, le GNL viendrait alimenter une partie des escales dans les ports de la région, notamment à Nice. En retenant un chiffre prudent de 400 escales par an tous ports confondus, consommant chacune 1 citerne, on obtient donc 400 citernes de 20 tonnes soit 8ktpa.

4.3 Le GNL carburant routier

L'utilisation du GNL en tant que carburant routier est majoritaire en termes de volume dans la région ; le deuxième usage concerne l'approvisionnement de l'industrie. En 2019, ce sont les seuls usages de GNL small scale dans la région (hors expérimentations). Les deux filières ont démarré en 2013 en France et en 2014 pour la région PACA. Depuis sa création, la demande en GNL carburant n'a cessé de croître et suit les ventes de

ACTIVITÉ TRANSPORT ROUTIER.

ENTREPRISES / VÉHICULES

Nombre d'entreprises par déplacement

Entreprises de transport de marchandises

Entreprises de transport de voyageurs

Nombre de véhicules par département

Entreprises de transport de marchandises

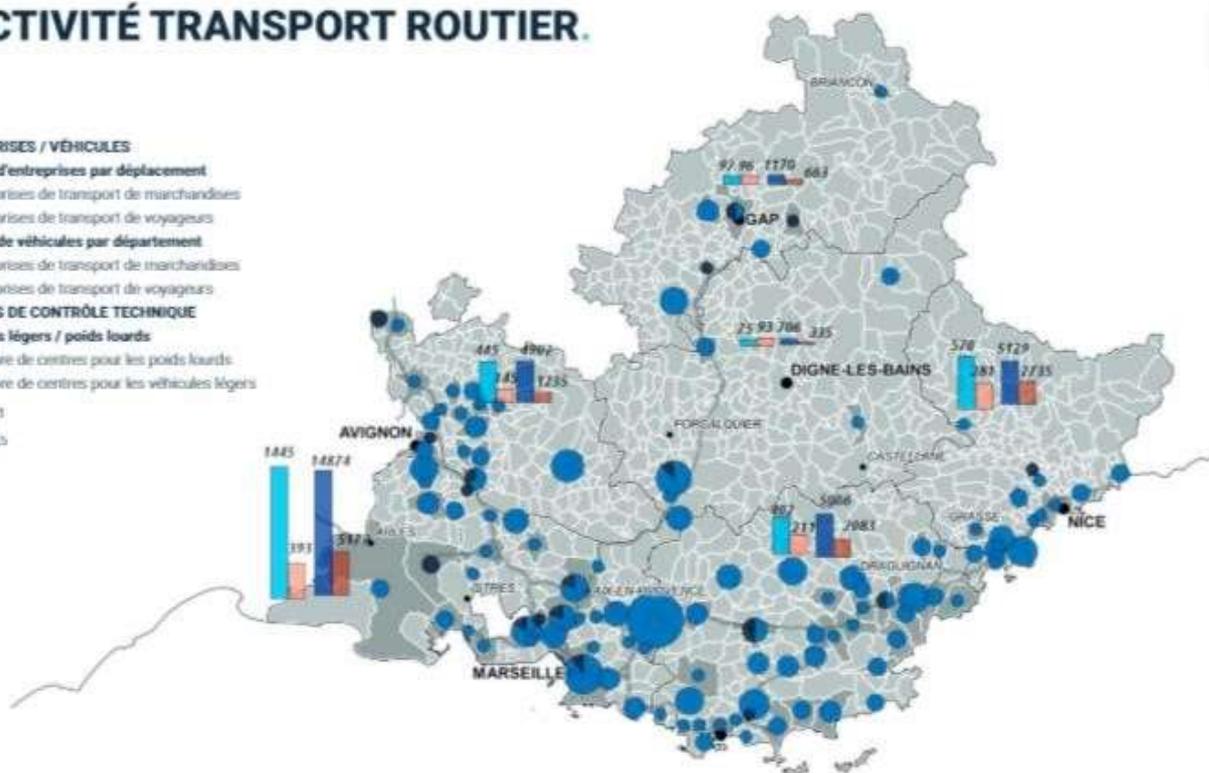
Entreprises de transport de voyageurs

CENTRES DE CONTRÔLE TECHNIQUE

Véhicules légers / poids lourds

Nombre de centres pour les poids lourds

Nombre de centres pour les véhicules légers



Source : © IGN BDcaro (BOREAL PACA)
 Réalisation : DREAL PACA - SCAD/ARC - J1 - 12-2019

0 25 50 75 km

Figure 11: activité du transport routier en PACA (ORT - ADEME 2018)

camions fonctionnant au GNV : +1 460 immatriculations réalisées en 2019 sur le segment 7,5 – 44 tonnes⁶ en France, soit une hausse de 37% sur une année. Sur ce segment de marché, les poids-lourds au gaz représentent 99% des ventes non-diesel. Les solutions hydrogène ou électrique ne sont pas encore matures ou non économiques et mettront plusieurs années à se développer, ce qui fait pour le moment du GNV la seule alternative au diesel sur ce segment de marché. Les stations GNL se développent aussi et l'on attend la création d'environ 3 stations publiques par an sur la région. Avec une alimentation moyenne de 70 citernes par an et par station, la croissance attendue est d'environ 4,2ktpa. La croissance européenne est de 68% sur les stations GNL. Jusqu'en 2021 où l'Italie devrait voir arriver ses premiers sites de chargement de citernes, la région accueillera sur ses routes, depuis Fos, l'ensemble du flux alimentant le sud de la France ainsi que presque 100% des besoins italiens, qui représentaient respectivement 25 et 100ktpa en 2019.

Il y a aussi un engouement récent chez les grands transporteurs de la région à bénéficier de stations privées au sein de leur plateforme logistique ce qui pourrait être le scénario haut qui viendrait s'ajouter au développement des seules stations publiques (scénario bas). Sur la carte précédente (cf. figure 11) issue du rapport d'activité 2018 de l'office régional des transports PACA⁷, on observe une très forte activité du transport routier le long des grands axes routiers de la région, 3034 entreprises de transport de marchandises dont 1 445 rien que dans les Bouches du Rhône, et 31 847 véhicules (dont environ 15 000 tracteurs 44 t éligibles aux motorisations GNL).

On peut considérer une hypothèse prudente d'équipement de 100 camions au GNL par an qui seront approvisionnés par des stations privées, à raison d'un plein de 345kg⁸ de GNL tous les deux jours (soit en moyenne 10 transporteurs par an disposant de leur propre station et complétant leur dispositif par une cuve GNL). On obtiendrait une consommation d'environ 6 300 tonnes par an supplémentaire⁹ à partir de stations privées situées dans ou à proximité des grands pôles logistiques regroupés à l'ouest et au sud de la région.¹⁰ (cf. figure 12), soit 63 000 t pour 1000 camions sur 10 ans (soit moins de 10% du parc de camions dans la région).

Il existe aussi des stations GNL mobiles depuis 2018 qui pourraient être déployées n'importe où dans la région pendant la semaine, et qui pourraient venir recharger à Fos le samedi soir. Encore peu développées (un cas observé à Lyon pour toute la France), elles pourraient convenir aux logisticiens qui souhaitent maîtriser leur approvisionnement ou minimiser les risques d'une conversion au GNL (car la station mobile peut se revendre contrairement à un point fixe) (cf. figure 13).

⁶ Lien vers l'article de presse : <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/poids-lourds-utilitaires-iveco-va-mettre-gaz-2020-2531.html>

⁷ Observatoire régional des transports – PACA (les chiffres clés des transports 2018)

<https://fr.calameo.com/read/00554619182699015b39c>

⁸ Chiffre issu d'un test organisé par Scania France, sous contrôle d'huissiers, d'un tracteur équipé du moteur gaz 9 litres 340 ch et de doubles réservoirs d'une capacité totale de 810 litres permettant l'emport de 345 kg de gaz.

<https://www.enerzine.com/le-scania-gnl-affiche-1196-km-dautonomie/17581-2016-04>

⁹ Détail du calcul : 365jours / 2 (pour une année) x100(nombre de camions convertis) x 0,345 (volume du plein en tonnes)

¹⁰ Source carte : https://www.investinpaca.com/files/Panorama_LogistiqTransport_2008_11Mo.pdf

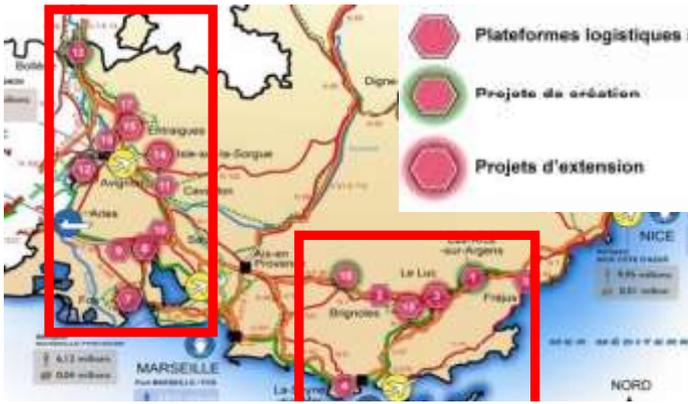


Figure 12 : carte schématique des plateformes logistiques en PACA



Figure 13 : photo d'une station mobile GNL développée par HAM

4.4 Le GNL carburant maritime

Après le GNL comme carburant routier, le GNL comme carburant maritime convainc de plus en plus d'armateurs pour satisfaire les exigences des nouvelles réglementations internationales IMO sur les émissions polluantes des navires, en raison de ses multiples avantages (cf. figure 14¹¹).

ENERGY SOURCE FUEL	HFO + SCRUBBER	LOW SULPHUR FUELS	FOSSIL (WITHOUT CS) LNG	METHANOL	LPG	BIO HVO (Advanced biodiesel)	AMMONIA	RENEWABLE (3) HYDROGEN	FULLY ELECTRIC
Highest priority parameters									
Energy density	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Technological maturity	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Local emissions	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GHG emissions	●	●	● ⁽²⁾	●	●	●	●	●	●
Energy cost	●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁴⁾
Capital cost									
Converter	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Storage	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bunkering availability	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Commercial readiness (1)	●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁵⁾
Other parameters									
Flammability	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Toxicity	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regulations and guidelines	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Global production capacity and locations	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figure 14 : tableau des paramètres des énergies et solutions pour le carburant maritime

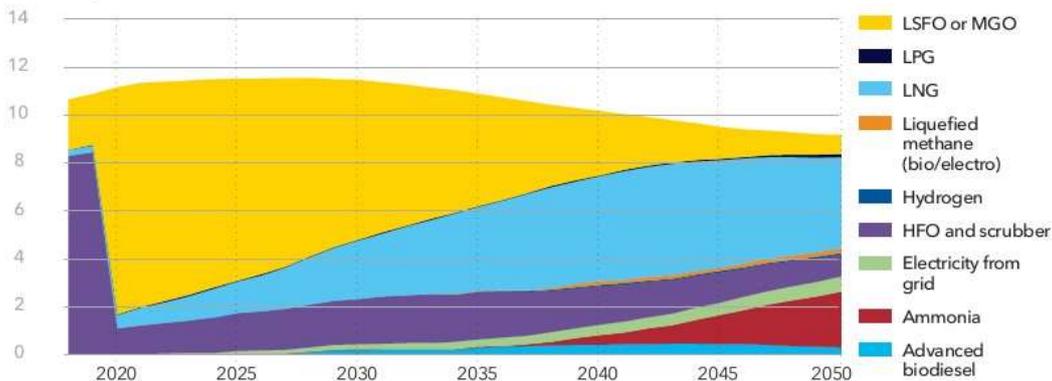
¹¹ Lien vers le rapport : https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2019/10/SEALNG_Alternative_fuels_narrative_V22.pdf

La croissance est très forte en Europe, poussée par la mise en place de zones ECA¹² en 2011 en Europe du Nord. A cet égard, les Etats méditerranéens se sont unanimement prononcés fin 2019 pour la mise en place d'une zone ECA en Méditerranée d'ici 2024. Une étude coréenne¹³ annonce que 60% des futurs navires construits dans les chantiers après 2025 (comprendre les nouvelles commandes) seront des navires à propulsion GNL. Selon le rapport 2019 de DNVGL Maritime Forecast to 2050 40% à 80% de la flotte mondiale pourrait être propulsée au GNL à l'horizon 2050 (cf. figure 15) :

FIGURE 4

Energy use and projected fuel mix 2018-2050 for the simulated IMO ambitions pathway with main focus on design requirements

Units: EJ/yr



LSFO, low-sulphur fuel oil; MGO, marine gas oil; LPG, liquefied petroleum gas; LNG, liquefied natural gas; HFO, heavy fuel oil; Advanced biodiesel, produced by advanced processes from non-food feedstocks

©DNV GL 2019

Figure 14 : projection jusqu'en 2050 du mix carburant maritime (DNG VL 2019)

Pour la région PACA, la première réalisation concrète attendue est le fruit d'un accord entre Total et l'armateur CMA CGM portant sur la fourniture annuelle d'environ 270 000 tonnes de GNL sur dix ans à partir de 2021¹⁴. Ce volume, couvrira l'approvisionnement de neuf futurs porte-conteneurs de CMA CGM dont la livraison est également prévue à partir de 2021. Ce soutage sera réalisé dans le port de Marseille par micro-méthanier (Ship-to-Ship).

Corsica Linea a également annoncé la commande d'un ferry au GNL à Marseille devant être livré en 2022. Par ailleurs, le port de Marseille a reçu en décembre dernier pour la première fois un paquebot de croisière

¹² ECA Emission Control Area ou zone d'émission contrôlée en français

¹³ Lien vers l'article : <https://www.seatrade-maritime.com/asia/lng-powered-ships-account-60-new-orders-2025-korean-study>

¹⁴ Source : <https://www.total.com/fr/medias/actualite/communiqués/carburants-marins-propres-total-fourira-en-gnles-futurs-porte-conteneurs-de-cma-cgm-marseille>

propulsé au GNL, le Costa Smeralda. D'autres annonces pourraient être faites par des armateurs dans les mois et années à venir, a fortiori si la zone ECA en Méditerranée venait à se concrétiser.

Si les perspectives sont encourageantes, l'évolution de la consommation de GNL pour cet usage reste incertaine : certains armateurs hésitent face au surcoût des navires au GNL et s'agissant des paquebots de croisière, le soutage peut être réalisé à Barcelone qui propose de tels services plutôt qu'en région PACA.

Dans un scénario bas, la consommation se limiterait aux navires déjà commandés (CMA CGM et Corsica Linea) sans développement ultérieur, ce qui porterait les besoins à environ 290 000 tonnes par an à partir de 2022.

Dans un scénario haut, on peut imaginer la mise en service progressive de ferries propulsés au GNL dans les ports de Marseille, Toulon et Nice, à raison d'un par an à partir de 2022, soit un renouvellement d'un tiers de la flotte actuelle (8 navires sur 23 pour Corsica Ferries, Corsica Linea et La Méridionale). Chaque nouveau ferry GNL devrait souler en moyenne environ 11ktpa par an¹⁵. A cela devrait s'ajouter le soutage des paquebots, qui se répartiront en Méditerranée entre Barcelone et Fos. Un scénario d'un nouveau paquebot tous les 3 ans sur la décennie semble réaliste. Leur besoin est estimé à 30 ktpa par navire de croisière.

Le soutage devrait être réalisé dans le port de Marseille principalement par ship-to-ship avec des soutages de ferries ponctuellement par truck-to-ship. A Toulon, en cas de conversion des ferries au GNL, les premières opérations devraient être réalisées par truck-to-ship mais l'hypothèse d'une barge de soutage deviendra rapidement nécessaire dans l'éventualité où plusieurs navires viendraient à être soutés. Le GNL pourra alors être acheminé depuis Fos sur Mer par voie maritime, ferroviaire ou routière. Le soutage à Nice devrait rester exceptionnel et réalisé exclusivement par camion-citerne.

Par ailleurs, à l'instar de l'usage carburant routier, la région PACA est susceptible d'alimenter, via ses terminaux méthaniers de Fos sur Mer, les régions limitrophes en GNL carburant maritime, notamment l'Occitanie et le nord de l'Italie. En fonction des volumes en jeu et de la distance, ces flux pourront être terrestres via des camions citernes, ou par voie maritime via des micro-méthaniers.

4.5 Le GNL carburant fluvial

Le réseau fluvial de Provence-Alpes-Côte d'Azur est particulièrement important avec ses quelques 140 km de voies navigables et ses 6 écluses sur les voies principales. Il est composé de voies permettant la circulation de grands gabarits. Néanmoins, le développement de l'utilisation du GNL n'apparaît pas aussi prometteur qu'il peut l'être pour le GNL carburant routier ou maritime. La durée de vie de la flotte est très longue, ce qui limite le potentiel de pénétration d'une énergie alternative. La situation économique du transport fluvial limite sa capacité à supporter le surcoût d'investissement d'une propulsion GNL (de l'ordre de 40%-50%).

Cela étant, le bassin du Rhône est directement connecté aux terminaux méthaniers de Fos-Tonkin et Fos Cavaou et le gabarit des navires se prête bien à la conversion GNL. Une étude financée par la Commission européenne (LNG logistics) en 2016-2019 tablait ainsi sur une consommation de 60 000 m³ de GNL (27 ktpa) par an à l'horizon 2030 qui constitue ici le scénario haut. Le soutage se ferait probablement par truck-to-ship et devrait se répartir entre Fos et la zone de Lyon (hors PACA donc), tronçon sur lequel a lieu l'essentiel du trafic (cf. figure 16).

Toutefois, compte tenu des incertitudes qui pèsent sur le développement de la filière, au regard des coûts à mobiliser et des faibles volumes en jeu, un scénario bas serait qu'aucune barge propulsée au GNL ne voit le jour sur le Rhône.

¹⁵ Détail du calcul : 220 tonnes par soutage x 3 rotations par semaine x 50 semaines / 3 (1 soutage pour 3 rotations)



Figure 15 16 : le réseau fluvial de Provence-Alpes-Côte d'Azur

4.6 Le GNL carburant ferroviaire

Le train en France utilise deux modes de propulsion : thermique (diesel) et électrique. Sur les 30 000 kilomètres de lignes du réseau ferré français, 15 000 kilomètres de lignes sont électrifiées et assurent la circulation de 90% du trafic voyageur. L'autre moitié des lignes ne voit donc passer que des locomotives diesel. Deux options peuvent être envisagées pour favoriser le développement durable du mode ferroviaire.

- D'une part l'électrification des lignes qui coûte entre 0,35 et 1,5 millions d'euros par kilomètre de voie simple, et de 0,7 million à 3 millions d'euros pour une ligne à double voie. Il faudra aussi en assurer l'entretien par la suite. Or, les lignes dont l'électrification est socialement ou économiquement intéressante sont désormais peu nombreuses.
- D'autre part, l'orientation du parc roulant vers des technologies de motorisation vertes et autonomes (emportant leur propre énergie de propulsion). Le coût de l'infrastructure est alors reporté en partie sur le coût du matériel roulant. C'est cette voie qui a été prise.

Dans le secteur ferroviaire, les autorités publiques et les principaux fabricants du matériel roulant (Bombardier et Alstom) ont choisi d'orienter leur effort sur l'hydrogène. Le GNV reste peu étudié pour le moment. Un prototype de locomotive à hydrogène a été homologué en mars 2020 pour le réseau ferré européen. Cependant, l'hydrogène reste encore très cher que ce soit en termes d'équipement ou en termes de coût du carburant. L'hydrogène carburant coûte entre 100 à 200€ du MWh, soit de 4 à 6€ par kg (prix à la sortie de l'électrolyseur)¹⁶, si la durée de fonctionnement est supérieure à 7 000 heures par an. Ce prix doit être augmenté des coûts de compression pour atteindre au total environ 10€/kg. En comparaison, le marché du gros pour le gaz devrait rester durablement installé sous les 20€/MWh et le GNL à la pompe en France est d'environ 1€/Kg. Par ailleurs, les locomotives sont réapprovisionnées au dépôt par camion-citerne dans la très grande majorité des cas. Ainsi le passage à des locomotives GNL ne bouleverserait pas la logistique et les pratiques existantes.

¹⁶ Données issues du rapport « Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France » (https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/verdissement_flotte_ferroviaire.pdf)

Le parc roulant français au diesel est de 3 500 locomotives avec des réservoirs d'environ 2,1m³ soit 0,94 tonnes. Pour la région PACA, le parc au 14 mars 2020 est composé de 137 locomotives dont 58 thermiques¹⁷ on pourrait imaginer le rétrofit ou l'achat de deux locomotives GNL pour 2023 pour l'homologation, et après un test concluant, l'achat de 10 locomotives supplémentaires pour les lignes non électrifiées (cf. figure 17) vers 2026. Pour un scénario haut, à raison d'un plein par jour en moyenne, on aurait une consommation annuelle de 687 tonnes par an pour les deux premières locomotives, puis un nouveau palier à 4 122tpa avec l'ajout de 10 locomotives supplémentaires. Dans un scénario pessimiste, c'est l'hydrogène, qui serait le carburant privilégié sur le ferroviaire.

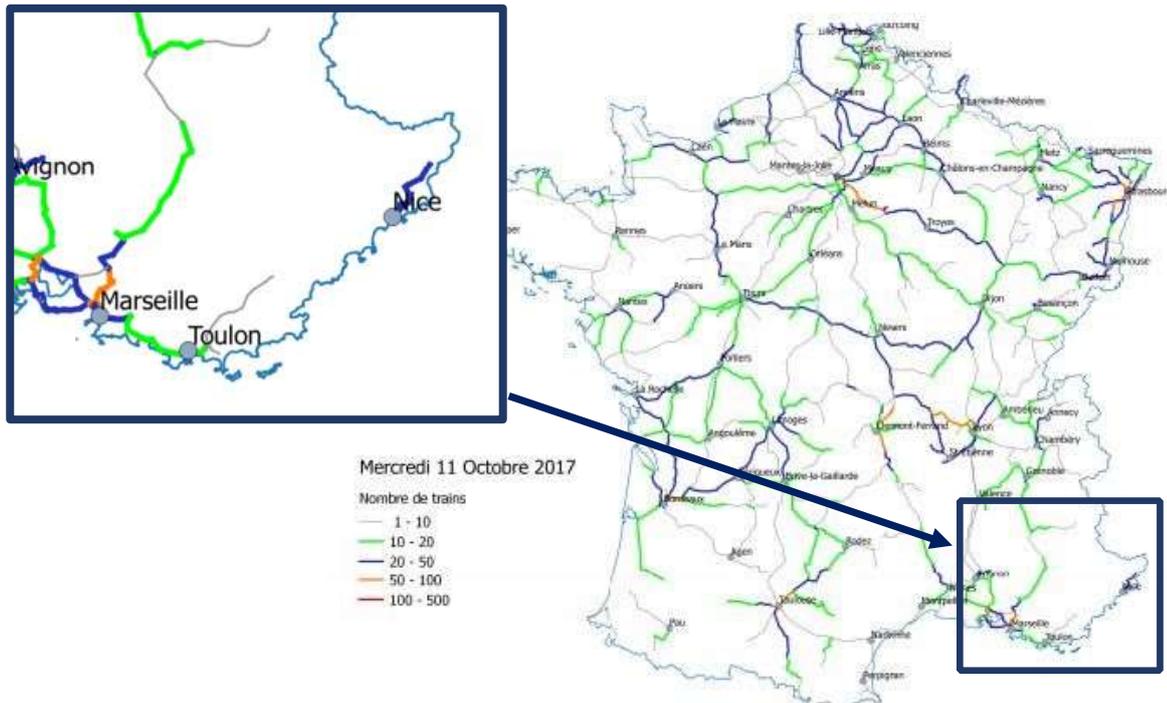


Illustration 1 : carte des circulations d'engins Diesel sur le réseau ferré (source : SNCF Réseau)
 Figure 16 : carte des circulations d'engins Diesel sur le réseau ferré (source : SNCF Réseau)

A noter que si le GNL n'est pas encore transporté par train en France, il fait partie des matières dangereuses encadrées par la réglementation ferroviaire internationale « RID » et peut tout à fait être transporté dans des contenants cryogéniques adaptés : des wagons GNL ou des conteneurs ISO. Des projets sont à l'étude chez Elengy pour connecter le terminal de Fos Tonkin aux réseau ferré national avec pour ambition le transport de GNL par le train d'ici 2023. Par ce mode de transport, il sera possible d'alimenter de manière massifiée des stockages satellites, dont certains pourrait être situés dans la zone de coopération Marittimo (nord de l'Italie par exemple), à un coût compétitif.

¹⁷ Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/TER_Provence-Alpes-C%C3%B4te_d%27Azur

4.7 Les usages domestiques du GNL

Depuis 2017, des cas d'utilisation du GNL pour des usages domestiques apparaissent dans des zones éloignées du réseau national de distribution de gaz naturel. La première commune à utiliser le GNL pour son réseau local est la commune de Molveno dans le Trentin Haut Adige. Cette dernière s'est équipée d'une petite installation de regazéification pour alimenter son réseau communal de distribution d'une longueur de de 4,4 km. L'installation comprend un réservoir de 80 m³ de GNL (équivalent à 56 000 m³ de gaz naturel à une pression de réseau de 2,4 bars), qui peut fournir une capacité de livraison de 2 500 m³/heure (cf. figure 18). Le chantier a duré un an et l'investissement total a été de 1,7 million d'euros, entièrement financé par la société d'énergie Dolomiti Gnl qui alimente le réseau par camion-citerne environ 5 fois par an. Une deuxième commune : Marilleva, également au Trentin a suivi l'exemple de



Molveno et d'autres communes de la région se sont montrées intéressées.

Cette nouvelle tendance italienne pourrait être répliquée en PACA sur les territoires non couverts par le réseau de distribution de GrDF¹⁸ (cf. figure 19). Cela concernerait principalement les départements des Alpes Maritimes (06) et Alpes de Haute Provence (04). On pourrait imaginer que des communes de la région qui souhaiteraient verdir leur réseau d'énergie au fioul ou au GPL, adopte le GNL. Dans un scénario haut, on verrait la conversion au GNL d'une commune de petite taille par an, soit une croissance de 5 camions par an, soit environ 100 tonnes par an. Cela représenterait une dizaine de communes sur 10 ans pour une consommation 1000 t de GNL par an. Le scénario bas retenu est que cet usage ne soit adopté par aucune commune de la région.

¹⁸ Source : http://www.crige-paca.org/geoportail/geocatalogue.html?id_lot_donnee_carto=750

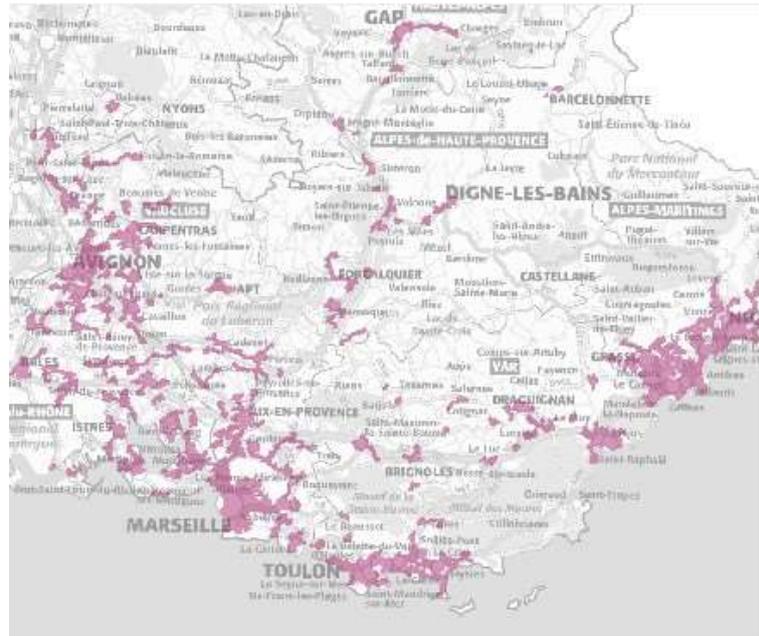


Figure 18 : carte du réseau de GrDF en région PACA (zones violettes)

4.8 Les usages

Concernant les perspectives de développement existant sur la conversion de leur soit pour du remplacement de chaudière fioul ou processus de fabrication). Seuls des sites non raccordables au réseau de gazeux devraient opter pour le GNL.

industriels du GNL industriels, des développement conversion de leur soit pour du remplacement de GPL, soit pour les fabrication). Seuls raccordables au distribution de gaz

A ce jour, deux sites industriels en région PACA sont alimentés au GNL, à hauteur de 51 citernes en 2019 (soit environ 1000 tonnes). Dans un scénario haut, on pourrait imaginer une croissance d'un site industriel tous les 3 ans qui se procureraient 25 citernes GNL par an, soit environ 500 tonnes par an (soit 3 sites sur 10 ans pour 1500 t de GNL par an). Comme pour le GNL domestique, on devrait retrouver ces sites plutôt sur les départements des Alpes Maritimes (06) et Alpes de Haute Provence (04). Un scénario bas serait qu'aucun site industriel ne passe au GNL.

5. Analyse comparative des scénarios bas et haut

Après avoir passé en revue les opportunités de développement du GNL en PACA et identifié pour chacune d'entre elle les perspectives de consommation (scénario haut et scénario bas), nous pouvons maintenant comparer les deux scénarios.

Premier constat : les usages du GNL au plus fort potentiel sont le carburant routier et maritime. Ce sont d'ailleurs les seuls usages qui sont retenus dans le scénario bas. (cf. figure 20). Les autres usages sont davantage à considérer comme des usages de niches, non retenus dans ce scénario.

- Pour le carburant routier, le socle est une croissance linéaire annuelle telle qu'observée sur les années passées mais qui plafonne en 2028 en raison d'un équilibre atteint sur le marché avec les autres modes de propulsion.
- Pour le maritime, il s'agit des commandes de navires propulsés au GNL connues à ce jour et estimées. Ces deux débouchés devraient assurer des volumes importants pour la région même dans le scénario bas.

SCENARIO PESSIMISTE (en Ktpa)	USAGES	
	Production électrique	Carburants

	Stations mobiles	Routier	Marin	Fluvial	Ferroviaire	Domestique	Industriel
2020	0	5	0	0	0	0	1
2021	0	9	135	0	0	0	1
2022	0	13	290	0	0	0	1
2023	0	17	290	0	0	0	1
2024	0	22	290	0	0	0	1
2025	0	26	290	0	0	0	1
2026	0	30	290	0	0	0	1
2027	0	34	290	0	0	0	1
2028	0	38	290	0	0	0	1
2029	0	40	290	0	0	0	1
2030	0	42	290	0	0	0	1

Figure 19 : projection sur 10 ans du scénario pessimiste

Dans le scénario haut, les développements concernent chacun des usages identifiés (cf. figure 21).

- La mise en place de stations mobiles pour la génération d'électricité pour les navires à quai se ferait en escalier au rythme de l'arrivée des navires neufs ou des adaptations de la flotte existante.
- Sur le routier, en plus de l'augmentation des 3 stations publiques attendues par an, s'ajoute le développement des stations privées couvrant les besoins de 100 camions GNL par an.
- Concernant le carburant marin, on ajoute à l'accord de fourniture de la CMA CGM et du navire de Corsica Linea, le soutage d'un ferry supplémentaire par an et un paquebot supplémentaire tous les 3 ans.
- Sur le carburant fluvial, la progression des consommations correspond aux volumes d'une étude européenne qui estime le besoin à 27ktpa avec des soutages répartis entre Fos et Lyon.
- Sur le carburant ferroviaire, le GNL pourrait être adopté en remplacement du diesel. On imagine des volumes pour deux locomotives nécessaires pour une homologation et par la suite, une commande de 10 locomotives en 2025. Ces dernières étant souvent commandées par lot.
- Pour le GNL à usage domestique, le scénario optimiste retenu correspond à la conversion au GNL d'une petite commune par an.
- Enfin pour l'usage industriel, les volumes représentent l'ajout d'un client industriel tous les 3 ans avec une consommation annuelle de 25 citernes GNL.

A l'horizon 2030 (cf. figure 22), la comparaison des volumes permet d'observer la part prépondérante du GNL en tant que carburant marin, mais avec une logistique essentiellement maritime et très concentrée (opération de soutage en ship-to-ship, couverte par deux ou trois microméthaniers ou barges de soutage et complétée par du truck-to-ship). A l'inverse, le GNL carburant routier contribuera largement au développement du réseau de distribution terrestre avec la multiplication des stations services et du trafic

de citernes associé. Quelques trafics ferroviaires pourraient voir le jour entre le bassin portuaire marseillais et le port de Toulon avec le transport de tanktainers de GNL pour approvisionner ce dernier (en carburant marin ou en pour des staitons d'électricité à quai). Ce transport ferroviaire est conditionné au développement d'autres trafics conteneurs entr les deux ports permettant la circulation de trains complets.

SCENARIO OPTIMISTE (en Ktpa)	USAGES						
	Production électrique	Carburants				Usage historique du gaz	
	Stations mobiles	Routier	Marin	Fluvial	Ferroviaire	Domestique	Industriel
2020	0	11	0	0	0	0	1
2021	8	22	146	0	0	0,1	1,5
2022	8	32	312	2	0	0,2	1,5
2023	8	43	353	5	0,7	0,3	1,5
2024	8	53	364	8	0,7	0,4	2
2025	8	64	375	11	4,1	0,5	2
2026	8	74	416	14	4,1	0,6	2
2027	8	85	427	18	4,1	0,7	2,5
2028	8	95	438	21	4,1	0,8	2,5
2029	8	103	479	24	4,1	0,9	2,5
2030	8	111	490	27	4,1	1	3

Figure 20 : projection sur 10 ans du scénario optimiste

SCENARIOS A 2030 (en Ktpa)	USAGES						
	Production électrique	Carburants				Usage historique du gaz	
	Stations mobiles	Routier	Marin	Fluvial	Ferroviaire	Domestique	Industriel
Bas	0	42	290	0	0	0	1
Haut	8	111	490	27	4	1	3

Figure 21 : volumes des scénarios pessimistes et optimistes à 2030

Au total (cf. figure 23), on retrouve une forte progression des volumes en 2021 et 2022 du fait de la mise en place et de la montée en puissance de l'accord CMA CGM, pour les deux scénarios. A partir de 2022, se dessinent un scénario bas plancher à croissance faible tirée par le GNL routier et un scénario haut à croissance plus forte tirée par la multiplicité des usages du GNL.

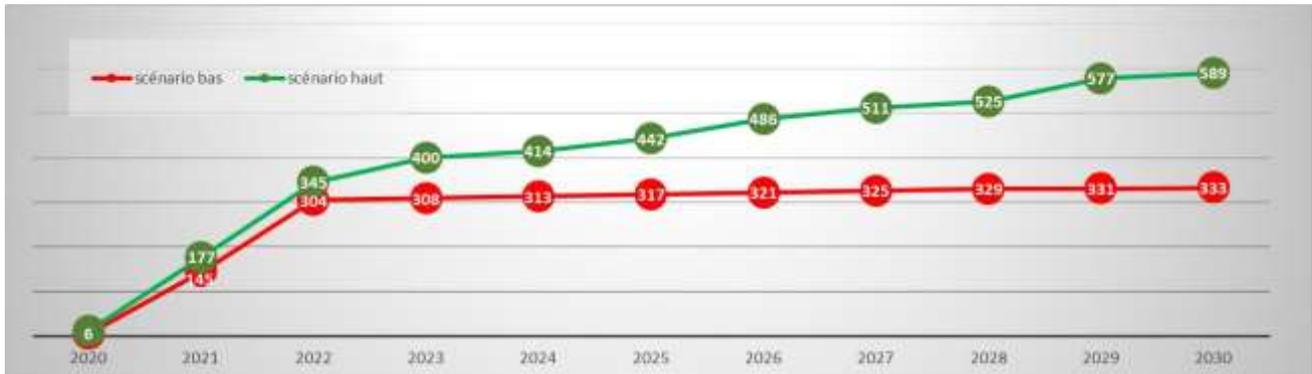


Figure 22 : graphique représentant les volumes des scénarios pessimistes et optimistes en Ktpa

6. Conclusion

Après avoir passé en revue la diversité du potentiel d’usages du GNL, il s’agit de décrire l’évolution du réseau de distribution et du transport dans la région Provence-Alpes-Côte d’Azur dans les années à venir, sur la base des volumes projetés des deux scénarios.

Un développement croissant et durable est très probable dans le routier et le maritime :

Routier :

- Augmentation du nombre de stations-services GNV le long des principaux axes routier et à proximité des plateformes logistiques du territoire
- Développement des stations privées sur les bases d’exploitation des transporteurs routier.

Les stations-services du territoire étant approvisionnées par citernes GNL à partir des terminaux de Fos, leur développement se traduira par une croissance des flux de transport par camions-citernes. Ces flux se concentreront sur les axes routiers principaux : axe sud-nord le long de l’A7, axe ouest-est de Fos vers Marseille-Toulon-Nice (A55, A50, A8), axe est-ouest de Fos vers Nîmes puis l’Occitanie (N568, A54). Par ailleurs, puisque les terminaux de Fos sont la principale source d’approvisionnement des stations-services et sites de stockage de GNL en Italie, les flux ouest-est seront renforcés vers l’Italie. Dans une moindre mesure, un flux régional en direction de Gap se développera.

La carte ci-dessous (figure 24) permet d’identifier les pôles logistiques du territoire et le maillage routier principal associé. Les développements fonciers logistiques récents se concentrent sur ces pôles ou le long des axes identifiés. Il en sera de même pour les développements futurs. Ainsi cette cartographie permet de préfigurer la localisation du futur réseau de stations-services (environ 25 stations à prévoir, hors stations privées) : principalement au niveau des pôles logistiques et dans une moindre mesure, le long des axes routiers principaux hors de ces pôles.

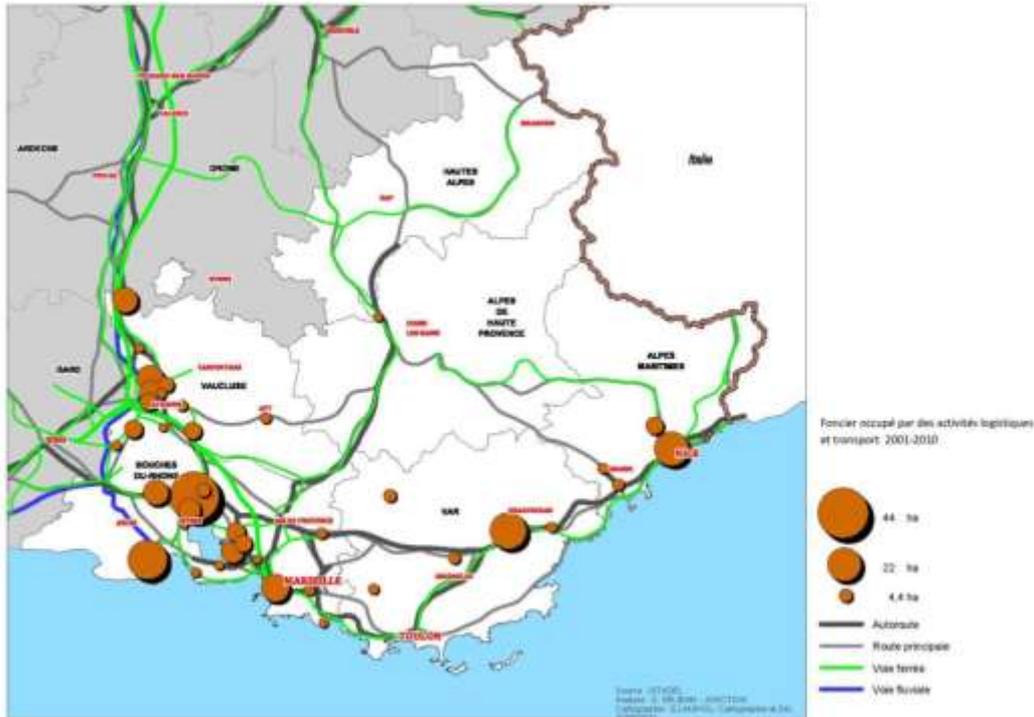


Figure 23 - Foncier logistique et transport 2001-2010 (source : <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr>)

Maritime :

Le GNL en tant que carburant marin devrait devenir le premier usage small scale de la région d'ici 2 ans. L'arrivée de ferries et de paquebots GNL va obliger les ports à s'équiper en solutions d'avitaillement GNL. Selon les ports, les solutions pourront être différentes.

- On sait déjà que le port de Marseille-Fos accueillera le micro-méthanier de Total pour l'approvisionnement des porte-conteneurs de l'armateur CMA CGM. D'autres micro-méthaniers ou barges pourraient également ravitailler les autres navires à mesure que le trafic augmentera.
- A Toulon, plusieurs solutions sont envisageables :
 - o Dans un premier temps, les solutions truck-to-ship sont adaptées aux petits volumes (approvisionnement de ferrys), complétées par l'approvisionnement de stations mobiles pour la fourniture d'électricité à quai à partir de camions-citernes
 - o A terme, avec l'augmentation des volumes, un stockage à quai peut être envisagé avec approvisionnement ferroviaire ou maritime (par micro-méthanier)
 - o Une solution alternative au stockage à terre reste le ship-to-ship par micro-méthanier ou barge, éventuellement complété par du truck-to-ship pour les plus petits volumes
- A Nice en revanche, le potentiel marché étant plus limité, la solution truck-to-ship semble la plus adaptée.

Ces développements seraient donc associés à un flux Ouest-Est (routier, maritime, voire ferroviaire), où Fos-Mer serait l'unique point d'approvisionnement des ports de Marseille, Toulon et Nice pour leurs besoins en soutage GNL.

Autres usages :

Les autres usages ont un potentiel de développement plus limité, mais peuvent constituer des réponses parfaitement adaptées à certaines problématiques locales. Les approvisionnements, compte-tenu des volumes relativement faibles et de la flexibilité attendue, seront réalisés par camions-citernes.

- L'usage industriel devrait rester limité aux sites éloignés des bassins de populations et des réseaux de gaz. Il ne devrait concerner qu'un très petit nombre de sites et donc être sans impact significatif sur le réseau de distribution de GNL.
- Sur le carburant fluvial, le potentiel reste limité, mais un développement reste envisageable à moyen terme.
- Concernant le GNL à usage domestique, les projections restent difficiles à effectuer. La décision appartient aux communes qui, lorsqu'elles cherchent à développer des sources d'énergies alternatives, ont tendance à privilégier la biomasse. Cependant, des applications pourraient voir le jour dans certains cas. Dans tous les cas, les volumes resteront très faibles.
- Les solutions mobiles de production d'électricité pour les navires à quai à partir de GNL constituent une réponse économique et mature. On peut s'attendre à ce que les ports s'équipent de cette solution en appoint, dans une phase de transition ou lorsque le raccordement au réseau est trop complexe. Il faudra malgré tout prévoir des aménagements et des procédures adaptées dans ces ports.
- Sur le ferroviaire, avant tout développement, il est nécessaire d'anticiper un délai correspondant à l'homologation des locomotives sur le réseau européen. Si cette homologation était obtenue, alors le développement pourrait être très rapide en raison des alternatives limitées et de la logistique aisée à mettre en place via des rechargements par camions-citernes au dépôt. La mise en place de la chaîne d'approvisionnement ne serait pas bouleversée. Bien sûr, à terme, des dépôts pourraient être déployés à des endroits clés du réseau, par exemple au niveau des ports maritimes et fluviaux multimodaux reliés au rail qui alimenteraient ainsi à la fois des barges maritimes ou fluviales et des locomotives.

Au total, pour les années qui viennent, le schéma de distribution dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (cf. figure 24), restera concentré sur Fos en tant que site d'approvisionnement pour la région et au-delà. La volumes principaux de distribution seront générés par l'usage maritime dès 2021, à destination des ports de Marseille puis éventuellement Toulon. Ces flux de distribution seront essentiellement assurés par la mer et dans une moindre mesure par la terre, voir le fer. La distribution terrestre continuera, à son échelle, de progresser fortement. Les flux terrestres resteront principalement destinés à l'extérieur de la région (vallée du Rhône et Italie) et connaîtront une forte progression au sein de la région, où ils viendront alimenter le nombre croissant de stations GNL qui devrait constituer à terme, un maillage d'une trentaine de stations GNL.

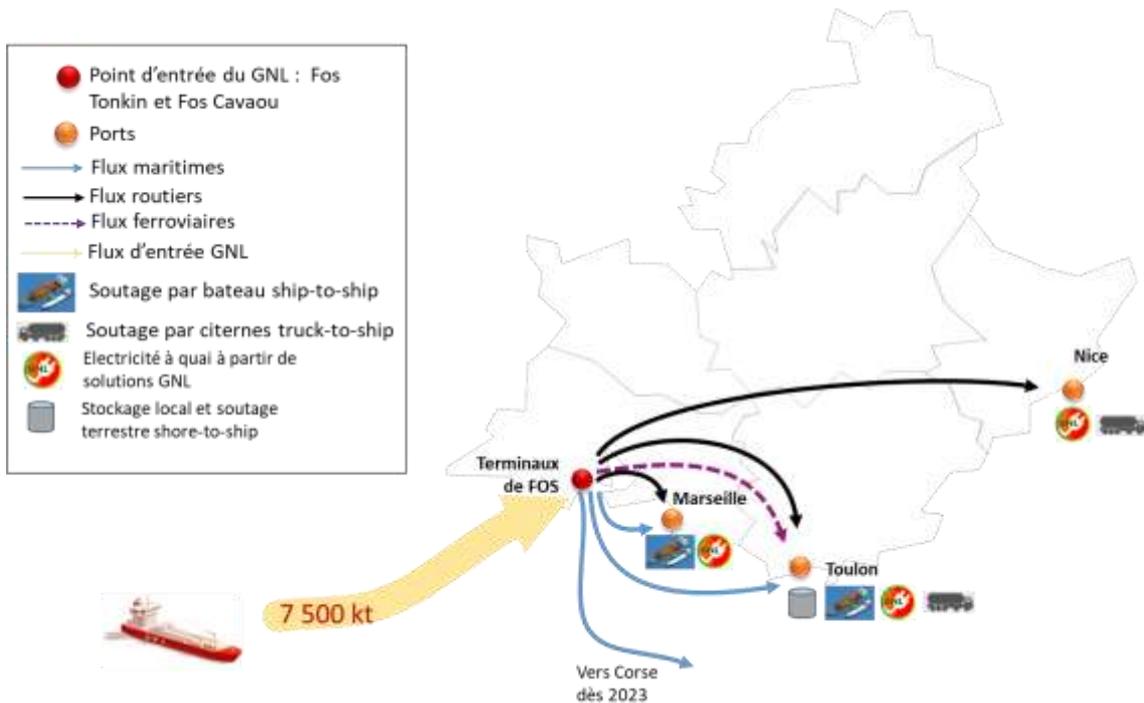


Figure 24 : Schéma cible de transport et distribution du GNL en PACA : potentiels de développement pour les usages portuaires et maritimes du GNL

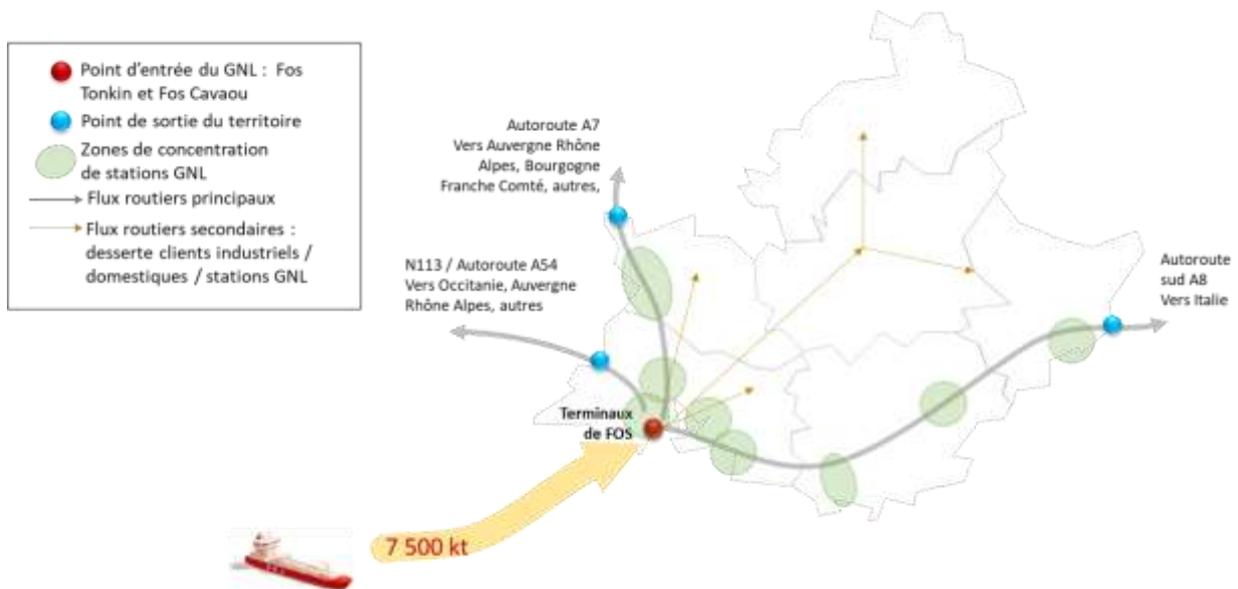


Figure 25 : Schéma cible de transport et distribution du GNL en PACA : potentiels de développement pour les usages terrestres du GNL : carburant, clients industriels, clients domestiques