

T3.4.1 Rapport d'analyse des fonctionnalités du réseau

PARTENAIRES:

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



Rapport d'activité T3.4

Exigences du réseau de distribution

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	
Codice prodotto	T3.4.1
Titolo del prodotto	Rapport d'analyse des fonctionnalités réseau
Codice del compito	T3.4
Titolo dell'attività	Exigences du réseau de distribution
Codice componente	T3
Titolo del componente	Plan du réseau de distribution et de transport de GNL sur le territoire
Entità responsabile dell'attività	Département de l'Industrie Sardaigne Région - CIREM Univ. De Cagliari -
Direttore scientifico di UNICA-CIREM a nome del Ministero dell'Industria	Professeur Paolo Fadda
Coordinatore dello studio unica-cirem per conto del Ministero dell'Industria	Ing. Federico Sollai
Scrittura del soggetto e della persona responsabile della scrittura del documento	REF-E S.r.l.
Versione	Final
Data	2/10/2020

Version	Date	Extender(s)	Description des changements
Final	2/10/2020	REF-E S.r.l.	Version finale



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
Abstract	6
1. Aspects méthodologiques : modèle de simulation de trafic	7
1.1 Zonage de référence	8
1.2 Graphique routier	12
1.3 Caractéristiques du graphique routier	14
Matrice O/D	18
1.5 Calcul du coût généralisé	22
1.6 Calibrage du modèle	22
1.7 Simulation de l'état des lieux	26
2. Aspects méthodologiques : calcul du coefficient de risque	33
Analyse des accidents sur le réseau routier de la Sardaigne	34
3.1 Généralités	34
3.2 Acquisition de données sur les accidents	34
3.3 Codage des routes sur le graphique	35
3.4 Calcul du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par année	38
3.5 Calcul du coefficient de risque pour la région de la Sardaigne	41
3. Calcul de l'indicateur de dommages potentiels	43
4.1 Généralités	43
4.2 Personnes dans d'autres véhicules en transit	43
4.3 Population exposée autour de l'axe routier	44
4.4 Éléments de vulnérabilité environnementale	46
4.5 Résumé des résultats	48
4. Identification des routes à moindre risque	49
5.1 Minimisation des risques et itinéraires routiers	49
5.2 Calcul des coefficients de risque	49
5.3 Affectation au réseau	49
Bibliographie et sitographie	51

Indice des chiffres

Figure 1. Diagramme logique des simulations de trafic	8
Figure 2. Lignes directrices externes	10
Figure 3. Zonage interne	11
Figure 4. Modèle national de trafic i-TraM: graphique routier Région de Sardaigne	13
Figure 5. Procédure de calcul des coefficients de ruissellement en fonction du niveau d'urbanisation de l'arc routier	16
Figure 6. Exemple de courbe de ruissellement	17
Figure 7. Mouvements lourds attirés par la zone	21
Figure 8. Emplacement des postes d'arpentage	24
Figure 9. Étalonnage du modèle régional – flux totaux	25
Figure 10. Étalonnage du modèle régional – flux lourds	26
Figure 11. Total des flux de véhicules – état des faits	28
Figure 12. Flux des camions– état des faits	29
Figure 13. Résumé des trajets globaux	30
Figure 14. Répartition des trajets en véhicules légers	31
Figure 15. Répartition des trajets des camions	32
Figure 16. Répartition des trajets des camions	36
Figure 17. Identification du coefficient de risque	43
Figure 18. Identification de la population exposée	45
Figure 19. Identification de la vulnérabilité environnementale	47

Index de table

Tableau 1. Paramètres de sortie – valeurs quotidiennes	15
Tableau 2. Coefficients correctifs pour le calcul de la capacité quotidienne	17
Tableau 3. Matrice d’OD par composant véhiculaire	19
Tableau 4. Volumes et voyages	31
Tableau 5. Résumé du volume et voyage d’état	32
Tableau 6. Itinéraire par route d’État	38
Tableau 7. Concentration des flux sur le réseau routier de l’État	38
Tableau 8. Taux d’accidents, de dommages et de mortalité sur le réseau routier – tous les accidents	39
Tableau 9. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - accidents impliquant des véhicules lourds	40
Tableau 10. Exposition au risque accessoire dans la rue	48

Abstrait

Ce document identifie la manière dont le réseau routier sarde a été paramétrisé afin de définir les excellents itinéraires, c'est-à-dire les moins risqués, pour les véhicules destinés à l'approvisionnement en GNL.

La base de nombreux paramètres présentés ici a été le raffinement sur l'ensemble du territoire régional du modèle national multimodal et multi-échelle de simulation i-TraM (*Italian Transport Model*)¹. Dans le cadre de cette étude, le modèle a été affiné et validé avec une référence spécifique à la Région Sardaigne, afin de reproduire la structure actuelle des flux de circulation circulant sur le réseau, en particulier en référence à ceux liés aux véhicules lourds du modèle, en moyenne en semaine en 2019. Compte tenu des objectifs du projet, l'opération s'est limitée au module de transport routier seulement, sans introduire d'hypothèses concernant les autres modes de transport (navigation maritime et aérienne, rail) présents dans le modèle national.

Le modèle utilisé pour simuler les conditions normales de circulation est également à la base de l'analyse des itinéraires des méthaniers par rapport aux risques accessoires correspondants.

Ce rapport décrira donc :

- les principales caractéristiques et résultats du modèle de trafic, également utilisé à l'appui de la définition des excellentes routes des méthaniers (*chapitre 2*);
- la méthodologie utilisée pour déterminer les coefficients de risque accessoires (*chapitre 3*);
- la construction d'indicateurs d'accidents sur le réseau routier (*chapitre 4*);
- la construction d'indicateurs relatifs à l'étendue des dommages potentiels, attendus en cas d'accident (*chapitre 5*);
- certaines premières indications portaient sur l'identification des itinéraires les moins risqués, qui seront ensuite affinés dans le rapport T3.5 (*chapitre 6*).

¹ Pour plus d'informations sur le modèle i-TraM, voir : <https://metaplanning.it/atlante/>

1. Aspects méthodologiques : modèle de simulation de trafic

Un modèle de trafic est un outil mathématique qui permet de reproduire, de manière approximative, le fonctionnement d'un système de transport.

Il repose essentiellement sur deux types d'entrées

- la description de la demande de mobilité, représentée par une matrice origine/destination (O/D) des mouvements de personnes, de marchandises ou de véhicules dans la zone ;
- la description de l'offre de transport, obtenue en rapportant les caractéristiques des différents axes de circulation à une structure mathématique appelée graphe, formée de nœuds et d'arcs qui les relie, dotés d'attributs appropriés (par exemple, la longueur, le nombre de voies, etc.).

Le modèle combine ces données en affectant au graphique la matrice O/D, c'est-à-dire en identifiant, pour chaque déplacement de chaque zone d'origine vers chaque zone de destination, effectué pour une raison donnée, le meilleur itinéraire par rapport aux coûts perçus par les usagers en termes de temps de parcours, de tarifs et de distances parcourues.

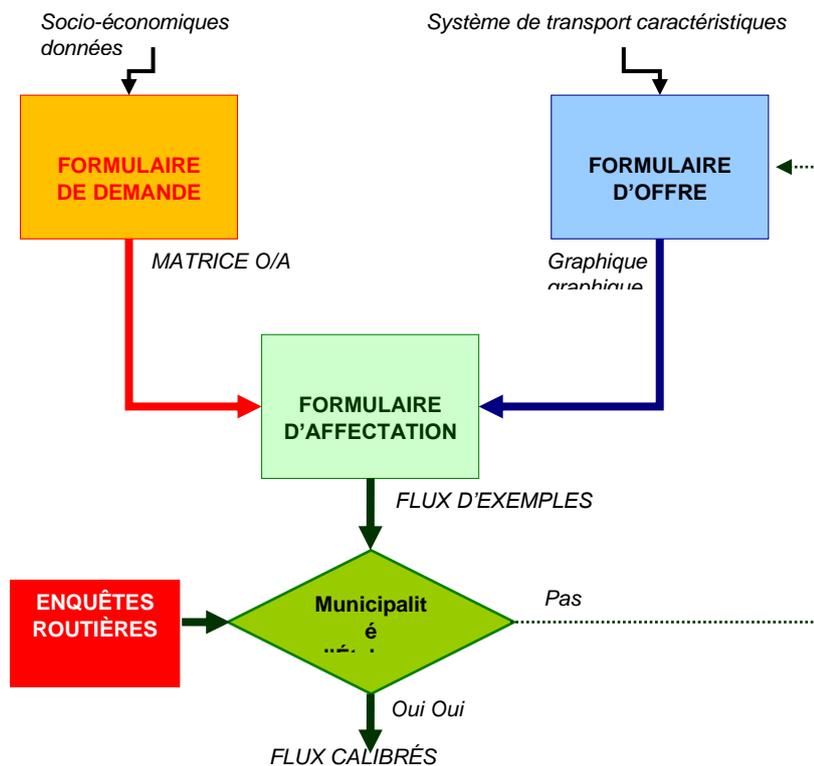
En additionnant tous les déplacements affectés à chaque itinéraire, il est possible d'estimer les flux de trafic sur tous les arcs du graphe.

Comme certains attributs des arcs - en particulier le temps de trajet - dépendent du nombre de trajets assignés aux arcs, cette procédure doit être répétée plusieurs fois, afin d'obtenir un équilibre entre les coûts de transport calculés et le choix des trajets par les utilisateurs du système.

Pour être fiable, chaque modèle de trafic doit être capable de reproduire, avec une approximation raisonnable, une situation réelle de trafic. Par conséquent, les flux simulés par le modèle doivent être comparés à ceux détectés dans la réalité, typiquement par des comptages de trafic, manuels ou automatiques, effectués indépendamment de la construction du modèle. La comparaison entre les débits simulés et mesurés est appelée *calibrage du modèle*, et peut donner lieu à des ajustements ciblés des *input*.

Une fois calibré, le modèle est capable de simuler des scénarios prévisionnels, indiquant les conditions de circulation attendues suite à des changements dans la demande de mobilité (par exemple, croissance de la population, nouvelles implantations urbaines...), ou dans l'offre de transport (par exemple, nouvelles liaisons routières, établissement de zones à circulation restreinte.).

Source: META Processing



Source : Traitement META

Figure 1. Diagramme logique des simulations de trafic

Par rapport aux enquêtes réalisées sur un ensemble de lieux forcément limité, le modèle permet d'estimer les volumes de trafic et les conditions d'écoulement correspondantes sur tous les arcs du graphique. Cela permet d'évaluer une série d'indicateurs importants, tels que les distances totales parcourues par les véhicules sur le territoire municipal, et les temps de parcours correspondants.

En appliquant à ces indicateurs les paramètres de consommation unitaire des véhicules circulant dans la zone, il est enfin possible d'estimer la quantité de carburant consommée par le trafic automobile dans la zone d'étude.

Ces indicateurs représentent le point de référence fondamental pour l'évaluation de la consommation globale quotidienne, mensuelle et annuelle.

Le chapitre suivant illustre, dans l'ordre, le zonage de référence (§ *Zonage de référence*), les éléments de base utilisés pour la reconstitution de la demande et de l'offre de transport (§ *Graphe routier* ; § *Matrice O/D*), les résultats du calibrage du modèle (§ *Calibrage du modèle*) et les résultats obtenus, en termes de reconstitution des charges des véhicules sur le réseau routier examiné (§ *Simulation de l'état réel*).

1.1 Zonage de référence

Dans sa configuration nationale, le modèle i-TraM est basé sur 1 784 zones, dont 87 se rapportent au territoire de la Région Sardaigne.

Pour une plus grande précision dans les élaborations, une agrégation des zones extérieures à la Région a été effectuée, et un affinement des zones intérieures.

En particulier, sur la base des connexions navales disponibles, 5 routes externes ont été identifiées (Figure 3) :

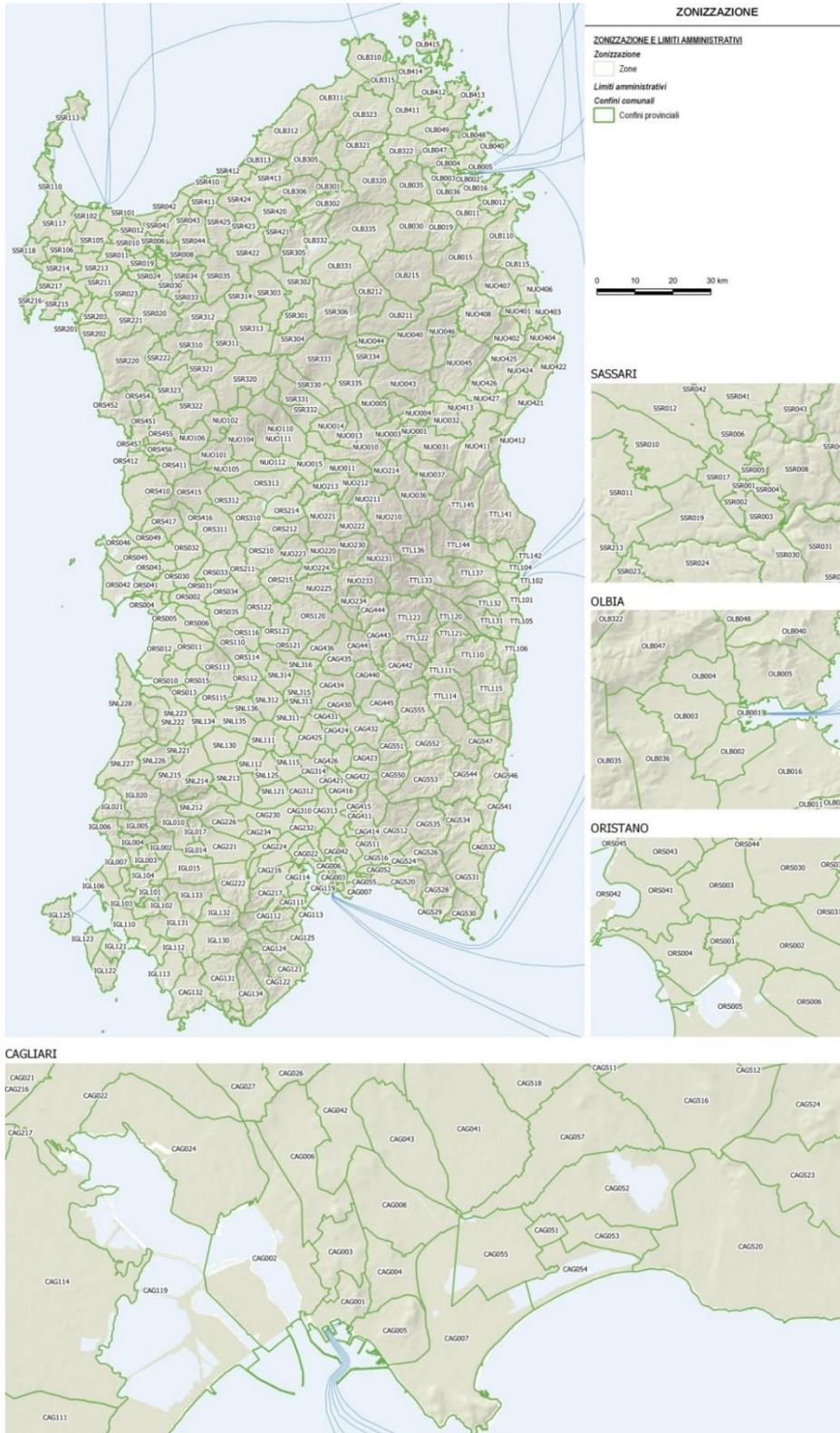
- - Direction nord-ouest
- - Direction nord-est+Toscane
- - Direction centrale
- - Direction Sud
- - Direction Calabre et Sicile.

A l'inverse, les zones de la Région se sont affinées, passant de 87 à 417 (Figure 4), dont :

- **186 sont référencés comme des municipalités uniques ;**
- **172 sont le résultat de la répartition des communes les plus peuplées et/ou des communes étendues dans plus d'une zone**
- **59 sont le résultat de l'agrégation de plusieurs municipalités dans une seule zone**



Source : TravailMETA
 Figure 2. Lignes directrices externes



Source : Traitement META
Figure 3. Zonage interne

1.2 Graphique routier

Le modèle de trafic reproduit les caractéristiques du réseau routier à l'aide d'un objet mathématique appelé **graphe**, composé de :

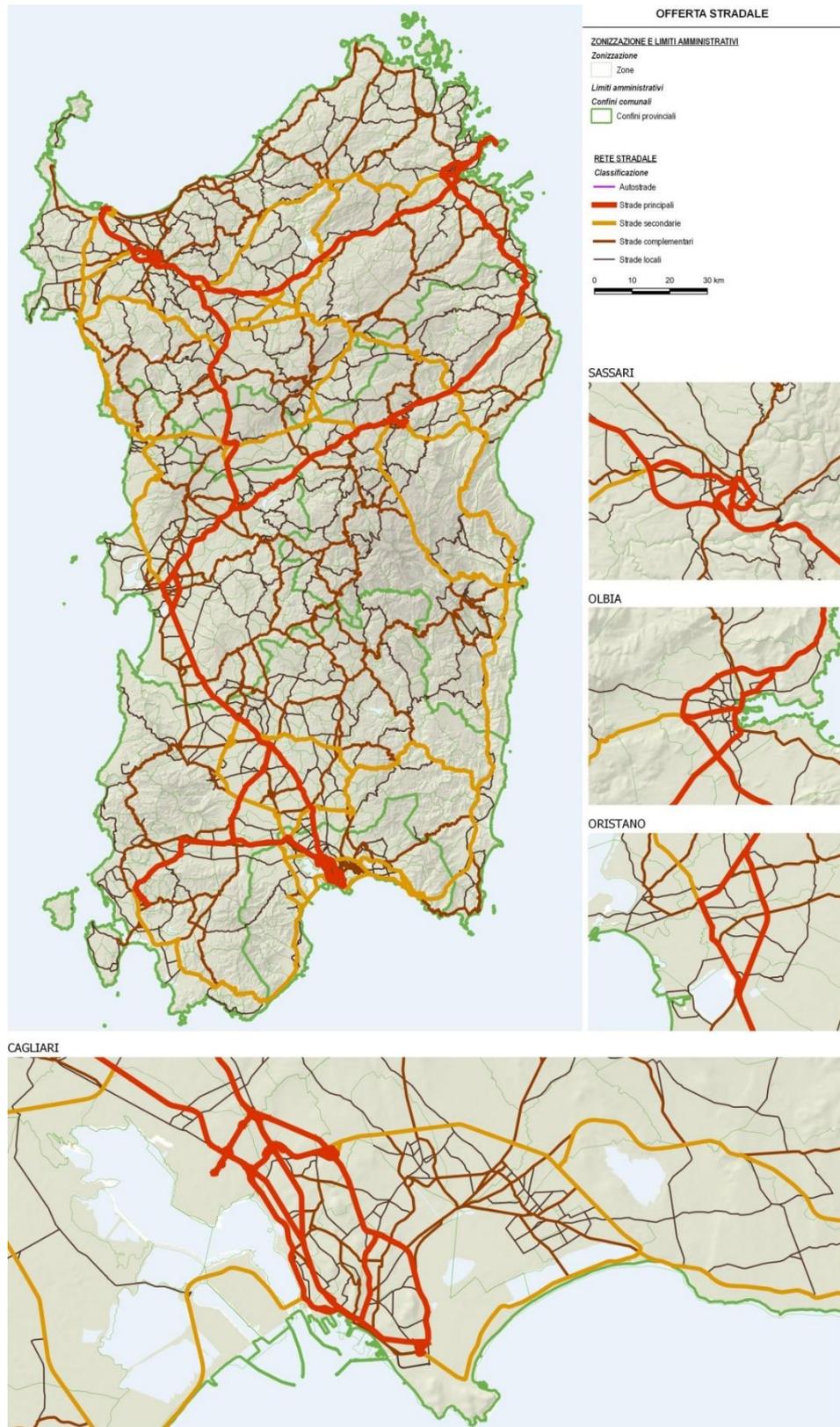
- un ensemble de **nœuds**, correspondant aux intersections
- un ensemble d'**arcs**, correspondant aux liaisons routières entre les mêmes nœuds.

Chacun de ces objets est décrit par des attributs appropriés, qui identifient les caractéristiques géométriques et fonctionnelles capables d'influencer le flux de véhicules. Par exemple, les arcs sont décrits par rapport au sens de la marche, au nombre de voies, à la pente, etc.

En combinant les attributs, il est possible de définir les grandeurs fondamentales qui régulent le flux de véhicules sur chaque portion du graphique, comme notamment la **vitesse de base** (c'est-à-dire la vitesse moyenne que peut maintenir un véhicule sur l'arc en l'absence de trafic) et la **capacité** (c'est-à-dire le nombre maximum de véhicules qui peuvent passer par l'arc dans une période de temps donnée). Chaque arc est ensuite caractérisé par une **fonction de ruissellement** $t = t(F)$, qui indique le temps de parcours, t , en fonction du flux de trafic, F .

Il convient de noter que **la classification du réseau** est effectuée en fonction des caractéristiques géométriques et fonctionnelles des routes et des connecteurs le long de l'itinéraire, et qu'elle n'est pas conçue comme une classification administrative du réseau.

Plus précisément, le graphe utilisé est composé de 7 166 arcs unidirectionnels et de 2 700 nœuds, pour une extension totale du réseau d'environ 7 700 km, dont 600 concernent le réseau routier principal (par exemple, la SS131 Carlo Felice), 1 100 le réseau routier secondaire, 2 100 le réseau complémentaire et enfin 3 900 le réseau local (**Figure 5**).



Source : TravailMETA

Figure 4. Modèle national de trafic i-TraM: graphique routier Région de Sardaigne

1.3 Caractéristiques du graphique routier

Les caractéristiques géométriques et fonctionnelles des arcs de routes simples sont décrites par une série d'attributs, en partie dérivés des sources cartographiques numériques utilisées, et en partie issus de vérifications directes, réalisées au moyen de relevés et/ou d'analyses d'images satellitaires ou photographiques disponibles sur le web.

Ces attributs comprennent notamment

- la typologie de l'arc, sélectionnée parmi 26 catégories différentes, correspondant à autant de combinaisons entre la configuration géométrique et le niveau de perturbation latérale/transversale associé à la présence de croisements, d'aires de stationnement, d'accès latéraux, etc.
- sa longueur, dérivée de la géométrie de l'arc
- la partie de la longueur qui se trouve dans les zones urbaines
- le nombre de voies
- le niveau de tarification éventuel (sections à péage).

L'ensemble du processus d'habillage du graphe routier, bien que réalisé en partie à partir de sources préexistantes, a fait l'objet d'une vérification manuelle et de tests de congruence par rapport aux fonctionnalités présentes sur le réseau.

Les attributs de l'arc contribuent à définir

- la **capacité de sortie C**, c'est-à-dire le nombre maximal de véhicules qui peuvent franchir l'arc dans l'unité de temps (jour ou heure)
- la **vitesse de base Vb**, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'arc peut être franchi en l'absence de trafic (rapport débit/capacité=0)
- la **vitesse à pleine charge Vc**, c'est-à-dire la vitesse à laquelle il peut être parcouru dans des conditions de saturation (rapport débit/capacité = 1)
- la vitesse de charge intermédiaire Vi (rapport débit/capacité = 0,75).

Sur la base de ces valeurs, les **paramètres de flux α et β** , à insérer dans les formules normales de **BPR**, qui permettent de déterminer le **temps de parcours T** en fonction du **flux de véhicules F** selon une expression du type:

$$T(F) = \frac{L}{Vb} \left[1 + \alpha \left(\frac{F}{C} \right)^\beta \right]$$

Une particularité du graphique routier utilisé est qu'il ne fait pas de distinction claire entre les situations urbaines et extra-urbaines, mais permet de décrire chaque arc sur la base du niveau réel d'urbanisation (% de la longueur tombant dans les zones urbaines). Les paramètres de débit sont obtenus, pour chaque arc, en imposant que les temps de parcours totaux correspondent à la

somme de ceux déterminés séparément sur les sections urbaines et extra-urbaines, pour des valeurs de rapport débit/capacité égales à 0, 0,75 et 1.

Au niveau actuel de définition, le modèle ne prend pas explicitement en compte les pertes de temps au nœud final, qui font pourtant partie des temps de parcours moyens pour chaque type d'arc.

Categoria	tipo arco	Capacità		Velocità di base		Velocità intermedia		Velocità a pieno carico	
		veic.eq./h/corsia	urbana	extraurbana	urbana	extraurbana	urbana	extraurbana	urbana
AUTOSTRADE	20 autostrada (generica)	2.100	2.000	120,0	110,0	75,0	110,0	101,0	70,0
RACCORDI E	21 autostrada a semplice carreggiata	1.950	1.850	110,0	99,4	71,9	95,0	83,8	58,4
TRAFORI	22 autostrada a doppia carreggiata e due corsie per senso di marcia	2.050	1.950	115,0	101,6	72,7	110,0	92,7	61,3
AUTOSTRADALI	23 autostrada a doppia carreggiata e tre o più corsie per senso di marcia	2.150	2.050	120,0	107,1	74,9	110,0	95,8	66,8
	25 zona di scambio a standard autostradale	1.850	1.550	120,0	107,1	74,9	90,0	78,2	54,7
	26 interconnessione autostradale	1.450	1.400	50,0	45,7	34,9	40,0	35,8	27,1
	27 traforo autostradale	1.450	1.450	110,0	99,4	71,9	95,0	86,1	63,3
	28 ramo di svincolo autostradale (senza barriera esaz.pedaggio)	1.350	1.300	50,0	45,7	34,9	40,0	35,7	27,1
	29 ramo di svincolo autostradale (con barriera esaz.pedaggio)	1.800	1.800	50,0	45,7	34,9	40,0	36,3	28,2
STRADE ORDINARIE	30 strada a disturbo locale ridotto (generica)	1.750	1.600	105,0	93,3	68,6	85,0	74,0	51,5
A DISTURBO LOCALE	31 superstrada a semplice carreggiata con intersezioni a liv.sfalsati	1.850	1.750	100,0	91,2	67,8	85,0	75,4	54,3
RIDOTTO	32 superstrada a doppia carreggiata con intersezioni a liv.sfalsati	1.950	1.850	110,0	98,8	70,8	90,0	78,7	55,5
(SUPERSTRADE)	34 ramo di svincolo od interconnessione	1.250	1.200	40,0	36,3	28,2	30,0	26,8	19,9
	35 superstrada/viale urbano a semplice carreggiata con intersezioni a raso	1.450	1.400	90,0	80,4	62,0	70,0	63,9	47,5
	36 superstrada/viale urbano a doppia carreggiata con intersezioni a raso	1.550	1.500	95,0	85,7	65,5	80,0	70,6	50,0
STRADE ORDINARIE	40 strada a disturbo locale medio (generica)	1.350	1.300	80,0	67,8	52,0	55,0	47,3	36,1
A DISTURBO LOCALE	41 strada a semplice carreggiata ed una corsia per senso di marcia (L<3,25 m) con banchine	1.400	1.350	80,0	67,3	52,9	60,0	51,8	39,0
MEDIO	42 strada a semplice carreggiata e due o più corsie per senso di marcia (L<3,25 m) con banchine	1.450	1.400	95,0	82,1	60,2	80,0	64,3	42,9
	43 strada a semplice carreggiata ed una corsia per senso di marcia (L<3,25 m) con parterre	1.550	1.500	90,0	76,4	57,3	70,0	58,2	41,2
	45 strada a semplice carreggiata ed una corsia per senso di marcia (L<3,25 m), senza banchine	1.300	1.250	75,0	63,6	50,2	50,0	42,9	31,9
STRADE ORDINARIE	50 strada a disturbo locale elevato (generica)	1.050	1.000	55,0	48,1	36,7	40,0	33,6	25,7
A DISTURBO LOCALE	51 strada a semplice carreggiata ed una corsia per senso di marcia (L<3,25 m), senza banchine	1.150	1.100	65,0	54,5	39,7	45,0	38,9	28,8
ELEVATO	52	1.400	1.200	75,0	59,8	44,9	55,0	42,0	27,0
	54	1.150	1.100	50,0	41,4	30,9	45,0	33,3	23,8
	55 strada a semplice carreggiata ed una corsia per senso di marcia (L<2,75 m) senza banchine	950	900	50,0	42,9	32,2	40,0	33,5	25,6
	56	800	750	55,0	46,7	34,9	40,0	33,3	25,3
	57 strada residenziale a traffico moderato (Zona 30)	800	750	40,0	30,3	22,9	35,0	25,7	18,2
	58 strada senso unico alternato (a vista)	500	500	50,0	41,1	31,5	30,0	26,3	20,1
	59 strada a senso unico alternato (con regolazione semaforica)	900	700	40,0	31,9	24,7	40,0	27,0	18,9

Source : Traitement META

Tableau 1. Paramètres de sortie – valeurs quotidiennes

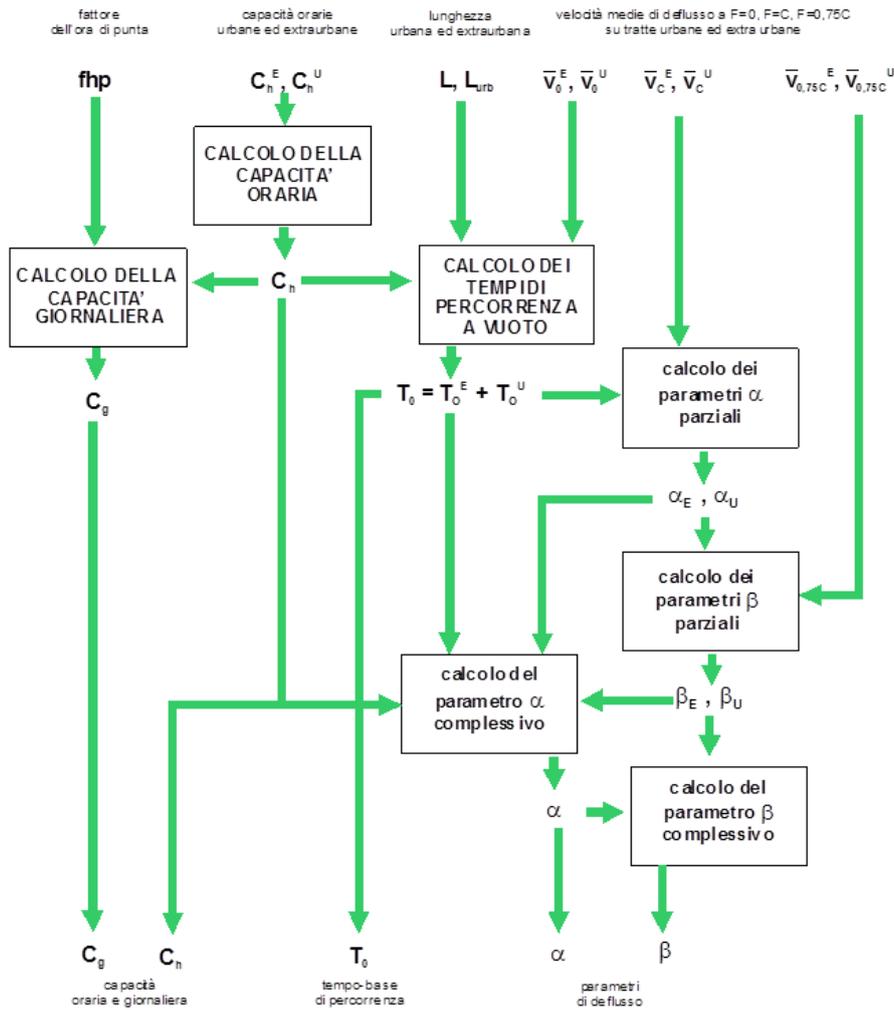


Figure 5. Procédure de calcul des coefficients de ruissellement en fonction du niveau d'urbanisation de l'arc routier

Les valeurs de **capacité horaire** sont définies en se référant à l'édition 2010 du manuel américain *Highway Capacity Manual (HCM)*, avec quelques adaptations développées en tenant compte :

- le manuel allemand de capacité routière (HBS = *Handbuch für die Bemessung vor Straßenverkehrsanlagen*, 2001, 20153) [Brilon 2000, Brilon et Bessler 2004, Brilon et Lohoff 2011].
- des normes suisses SN640 018a (2006) SN640 020a (2010).

Si les simulations sont effectuées en termes de trafic journalier moyen (TGM), ces valeurs doivent être traduites en capacité journalière pratique. L'opération est effectuée en supposant que la distribution quotidienne des flux de véhicules sur chaque arc est fonction, en premier lieu, de sa classe. En subdivisant les 24 heures de la journée en 4 heures caractérisées par un débit maximal, 8 heures caractérisées par un débit intermédiaire, et 12 heures caractérisées par un

débit minimal, il est possible de calculer des coefficients multiplicatifs, auxquels correspondent autant de facteurs d'heure de pointe.

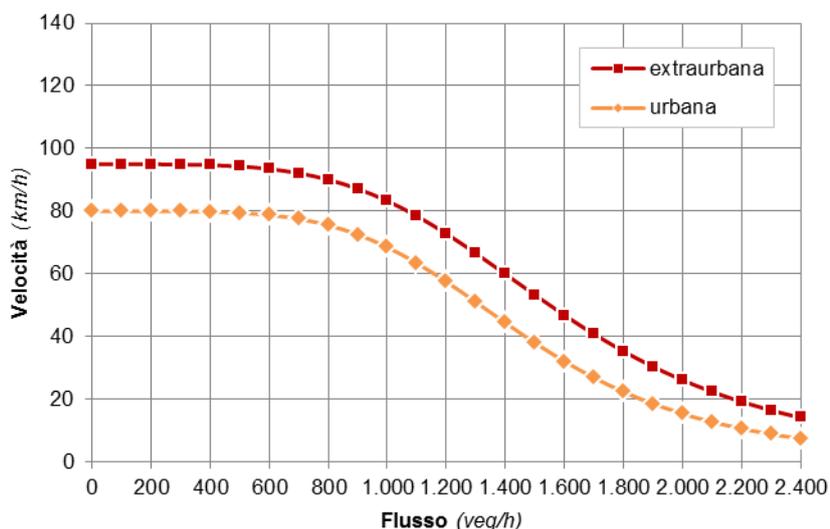
COEFFICIENTI CORRETTIVI PER IL CALCOLO DELLA CAPACITA' GIORNALIERA						
Rapporto F/C in funzione del rango						
Fascia oraria	ore/giorno	2	3	4	5	6
punta	4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
intermedio	8	0,70	0,65	0,60	0,58	0,55
morbida	12	0,28	0,23	0,18	0,16	0,13
TOTALE	24	13,00	12,00	11,00	10,50	10,00
Fattore dell'ora di punta		7,7%	8,3%	9,1%	9,5%	10,0%

Source : Traitement META

Tableau 2. Coefficients correctifs pour le calcul de la capacité quotidienne

L'utilisation des capacités journalières pratiques implique également le recalcul des vitesses de référence pour les trois valeurs du rapport débit/capacité (0, 0,75 et 1) et, par conséquent, la redétermination des courbes de débit de chaque arc, référées aux conditions moyennes de transit selon la classe fonctionnelle de la liaison, la typologie routière correspondante et son niveau d'urbanisation.

Une fois déterminées les capacités pratiques et les vitesses moyennes journalières de base, ainsi que les coefficients α et β qui permettent de reproduire les vitesses en conditions de forte charge ($F/C=0,75$) et de saturation de capacité ($F/C=1,0$), les courbes de débit permettent de décrire les vitesses moyennes, et donc les temps de parcours nécessaires pour parcourir chaque arc routier, en fonction du flux de véhicules qui lui est affecté.



Source : Traitement META

Figure 6. Exemple de courbe de ruissellement

Matrice O/D

Une fois la configuration du réseau routier décrite, le modèle doit reproduire les déplacements effectués sur ce réseau par des véhicules individuels. Pour ce faire, on utilise une **matrice origine/destination (O/D)**, qui décrit la **demande de mobilité** existante dans une zone donnée, en identifiant le nombre de véhicules qui doivent s'y déplacer pendant une période donnée.

La matrice décrit chaque déplacement en identifiant la zone de trafic où il commence (origine) et où il se termine (destination).

Dans le cas du modèle sarde, la matrice utilisée découle du raffinement de celle utilisée par le modèle I-TraM, ramenée à un zonage plus fin à l'intérieur du secteur d'analyse sur la base de coefficients de génération et d'attraction² spécifiques :

La matrice résultante est composée notamment des composantes de la demande suivantes :

- mouvements systématiques, distingués entre **études et travail** et dérivés de la matrice OD de l'ISTAT 2011
- les déplacements occasionnels, ventilés en déplacements **professionnels, personnels et de loisirs**, et précédemment calculés à l'échelle nationale selon des algorithmes consolidés de génération, de distribution et de répartition modale
- mouvements de **véhicules lourds** (>3,5 tonnes), obtenus en divisant la matrice européenne ETIS/Transtools décrivant les échanges interprovinciaux sur la base de descripteurs territoriaux appropriés représentatifs des principales catégories de produits.

Afin de garantir la comparabilité réciproque, toutes les valeurs relatives aux flux de véhicules ont été exprimées en véhicules équivalents³.

Dans l'ensemble, la matrice O/D quotidienne attribuée par le modèle de trafic comprend environ 1,6 million de mouvements de véhicules par jour, dont près de 13 000 effectués par des véhicules lourds et le reste par des voitures (tableau 3).

Dans le cas des véhicules légers, la plupart des mouvements sont internes aux provinces et sont donc concentrés sur la diagonale. La matrice des véhicules lourds est distribuée de manière plus équilibrée : la diagonale a un poids plus faible, et les relations les plus pertinentes sont celles à l'intérieur de la ville métropolitaine de Cagliari et les mouvements entre Cagliari et Sassari.

le mouvement des **camions** (>3. 5 tonnes), prise en divisant la matrice européenne ETIS/Transtools descriptive des échanges interprovinciaux sur la base de descripteurs territoriaux appropriés représentatifs des principales catégories de produits.

² Les coefficients de génération ont été calculés sur la base de la densité de population de chaque zone, tandis que les coefficients d'attraction ont été calculés sur la base de la répartition des employés. Ces distributions ont été calculées grâce à l'utilisation des données du recensement ISTAT 2011 par zone de recensement.

³ La traduction en véhicules équivalents consiste à donner à une catégorie de véhicules (p. ex. les camions) un poids dans les véhicules légers, en fonction de l'empreinte fixe d'un seul véhicule dans cette catégorie. Sur la base également de la composition des flux lourds qui ont émergé des enquêtes de circulation, il a été décidé en l'espèce de considérer qu'en moyenne, un véhicule lourd équivaut à 2 véhicules légers

Afin d'assurer une comparabilité mutuelle, toutes les valeurs relatives aux flux de véhicules ont été exprimées dans des véhicules équivalents.⁴

Dans l'ensemble, la matrice o/d quotidienne assignée par le modèle de trafic comprend environ 1.6 millions de mouvements de véhicules par jour, dont près de 13.000 par les poids lourds et le reste en voiture (**Tableau 3**).

Dans le cas des véhicules légers, la plupart des trajets se font à l'intérieur des provinces et se concentrent donc sur la diagonale. La matrice des camions est plus distribuée : la diagonale a un poids inférieur, et les relations les plus pertinentes sont les intérieurs de la ville métropolitaine de Cagliari et les mouvements entre Cagliari et Sassari.

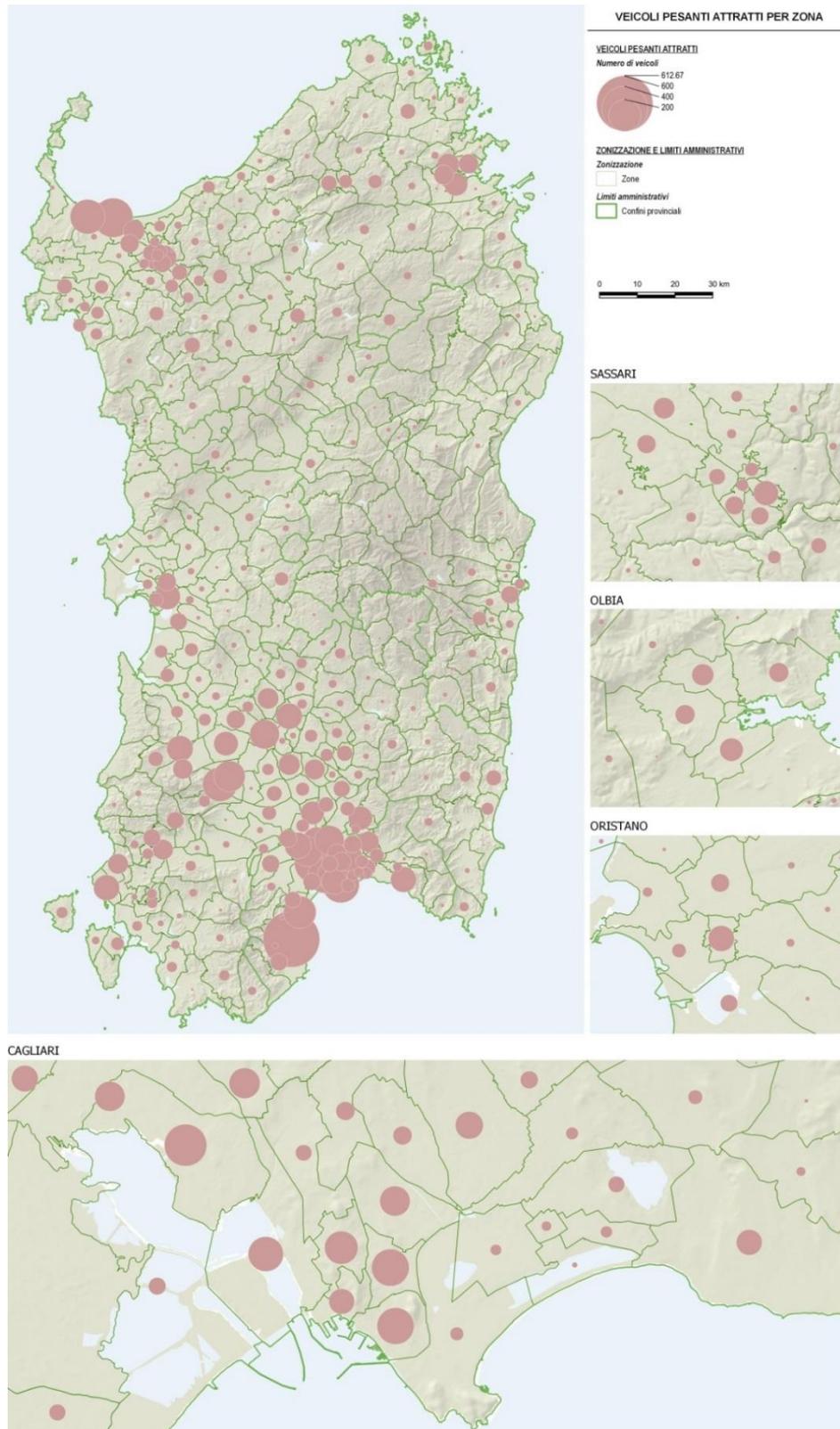
REGIONE SARDEGNA							
MATRICE SPOSTAMENTI STRADALI							
(veicoli/giorno)							
LEGGERI							
	90	95	91	111	92	OTH	TOTALE
90 Prov. Sassari	440.705	1.626	8.788	203	566	242	452.129
95 Prov. Oristano	1.626	116.525	5.237	6.300	2.136	71	131.895
91 Prov. Nuoro	8.788	5.237	137.960	1.383	1.048	95	154.512
111 Prov. Sud Sardegna	203	6.300	1.383	227.499	38.618	146	274.149
92 Prov. Cagliari	566	2.136	1.048	38.618	547.457	212	590.037
OTH Continente	242	71	95	146	212	-	765
TOTALE	452.129	131.895	154.512	274.149	590.037	765	1.603.487
PESANTI							
	90	95	91	111	92	OTH	TOTALE
90 Prov. Sassari	1.505	171	77	267	247	512	2.778
95 Prov. Oristano	171	145	27	120	158	71	693
91 Prov. Nuoro	77	27	74	53	105	70	407
111 Prov. Sud Sardegna	267	120	53	913	1.734	338	3.425
92 Prov. Cagliari	247	158	105	1.734	1.856	209	4.309
OTH Continente	512	71	70	338	209	-	1.200
TOTALE	2.778	693	407	3.425	4.309	1.200	12.811
TOTALI							
	90	95	91	111	92	OTH	TOTALE
90 Prov. Sassari	442.209	1.797	8.865	470	813	753	454.906
95 Prov. Oristano	1.797	116.671	5.264	6.420	2.295	142	132.588
91 Prov. Nuoro	8.865	5.264	138.035	1.436	1.153	165	154.918
111 Prov. Sud Sardegna	470	6.420	1.436	228.412	40.352	484	277.574
92 Prov. Cagliari	813	2.295	1.153	40.352	549.313	421	594.346
OTH Continente	753	142	165	484	421	-	1.965
TOTALE	454.906	132.588	154.918	277.574	594.346	1.965	1.616.298

Source : TravailMETA

Tableau 3. Matrice d'OD par composant véhiculaire

En attribuant le nombre total de flux attirés aux différentes zones, il est possible d'avoir une représentation cartographique des principaux systèmes territoriaux (**Figure 6**). En particulier, dans le cas des flux de véhicules lourds, trois concentrations apparaissent

- au nord, le système Sassari-Alghero, y compris Porto Torres, et Olbia
- au centre, les centres d'Oristano et, dans une moindre mesure, de Tortolì-Arbatax
- au sud, où se concentrent les attractions les plus importantes, le système de Cagliari, y compris la raffinerie de Sarroch. Il existe également un certain nombre d'attractions de taille moyenne dans le quadrant situé au nord-ouest de Cagliari (par exemple, Sanluri, Villacidro, Iglesias)..



Source : TravailMETA
 Figure 7. Mouvements lourds attirés par la zone

1.5 Calcul du coût généralisé

L'affectation des matrices O/D du trafic léger et lourd au réseau routier est effectuée en termes de TGM, exprimés en véhicules équivalents/jour, en minimisant pour chaque composante un **coût de déplacement généralisé** déterminé comme suit :

$$g(i,j,k) = \gamma(k) t(i,j) + c(i,j) + \delta(k) p(i,j,k)$$

où :

$t(i,j)$ = temps de déplacement le long de l'arc i,j

$\gamma(k)$ = valeur du temps alloué à la catégorie k

$c(i,j,k)$ = coût opérationnel associé au déplacement le long de l'arc

$\delta(k)$ = coefficient de perception du péage pour la catégorie k

$p(i,j)$ = péage associé au passage de l'arc i,j :

Les temps de parcours $t(i,j)$ sont à leur tour déterminés en fonction du débit passant sur l'arc F , en utilisant les fonctions BPR déjà illustrées au paragraphe précédent, avec les coefficients d'homogénéisation suivants

- véhicules légers 1.0
- camions 2.0

Dans le cas des véhicules lourds, les vitesses moyennes sont plafonnées à des valeurs prédéfinies (90 km/h sur les autoroutes et les voies rapides), ce qui entraîne des temps de parcours plus longs que pour les véhicules légers.

1.6 Calibrage du modèle

La fiabilité du modèle est corrélée à sa capacité à reproduire, avec une approximation suffisante, les flux de véhicules enregistrés sur le réseau routier. D'où la nécessité de soumettre le modèle à une phase de **calibration** précise, visant à "affiner" les attributs du graphique et de la matrice.

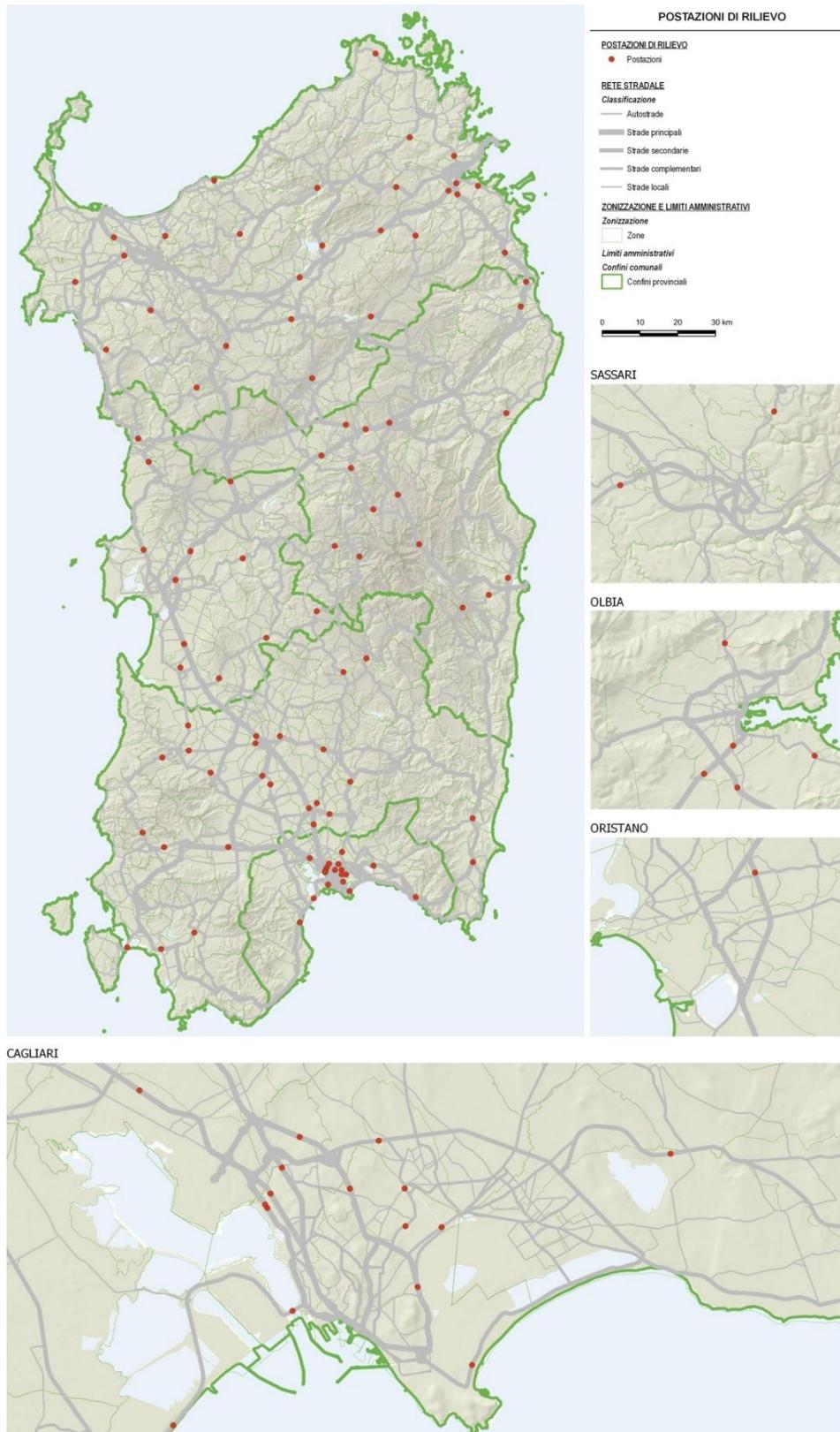
Dans le cas du modèle pour la Région de la Sardaigne, la calibration a été effectuée sur la base des données de trafic mises à disposition par deux sources principales.

- Données TGM ANAS, calculées grâce au réseau de capteurs PANAMA et disponibles pour les années 2013-2019. Pour chaque emplacement, la moyenne bidirectionnelle des véhicules légers et lourds circulant un jour moyen est rapportée. Comme les données de 2019 n'étaient pas disponibles pour tous les sites, l'année la plus récente disponible a été utilisée pour chacun d'entre eux.
- Données de la salle de contrôle de la mobilité de la municipalité de Cagliari, qui renvoie le cordon de Cagliari sur la base de 9 emplacements. Pour chaque station, le nombre total de

véhicules en transit par direction est indiqué, mais sans distinction entre véhicules légers et lourds.

Il faut noter que, à l'exclusion de Cagliari, les principaux centres urbains n'ont pas une couverture suffisante de stations pour vérifier avec précision la correspondance entre le flux simulé et le flux réel de véhicules.

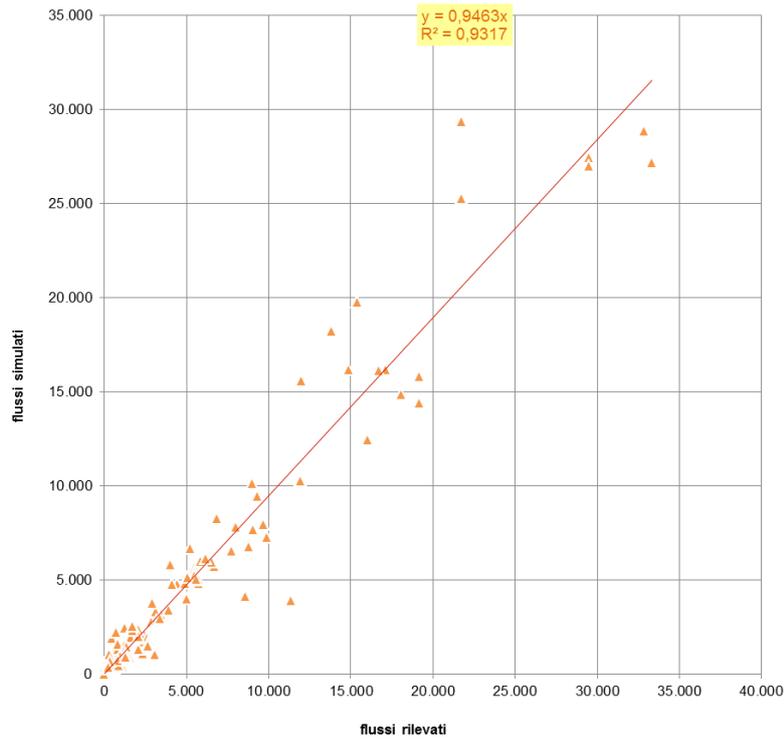
L'image suivante (**Figure 7**) montre la localisation des points de calibrage utilisés sur l'ensemble du territoire régional.



Source : TravailMETA

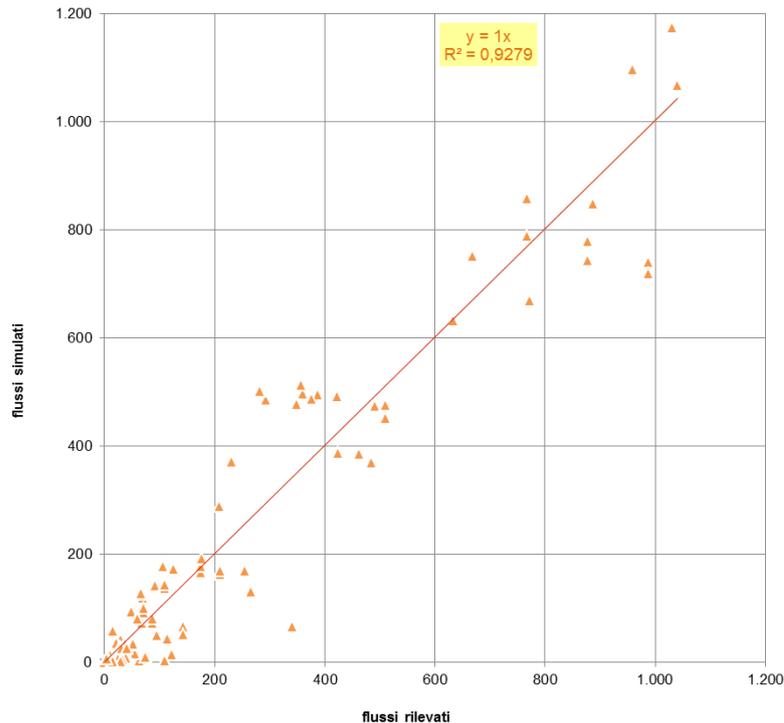
Figure 8. Emplacement des postes d'arpentage

La comparaison entre les flux mesurés et ceux simulés par le modèle de trafic montre l'obtention d'un bon niveau de corrélation, avec un paramètre R^2 égal à 0,93 sur l'ensemble du réseau et à 0,94 sur le nombre total de véhicules en circulation (**Figure 8**). En ce qui concerne les véhicules lourds, en revanche, l'intercept est égal à 1, tandis que le R^2 est proche de 0,93 (**Figure 9**)..



Source : TravailMETA

Figure 9. Étalonnage du modèle régional – flux totaux



Source : TravailMETA

Figure 10. Étalonnage du modèle régional – flux lourds

1.7 Simulation de l'état des lieux

Le modèle de simulation du trafic, convenablement calibré, fournit une description raisonnablement précise des charges de véhicules sur le réseau routier régional un jour de semaine moyen.

En ce qui concerne le réseau primaire et de distribution, qui est directement affecté par les comptages de trafic utilisés dans la phase de calibration, sa fiabilité reflète les conditions décrites dans le paragraphe précédent, tandis qu'en ce qui concerne le réseau strictement local, les résultats obtenus prennent une valeur plus indicative qui pourra être mieux définie dans les phases ultérieures si des enquêtes sur le terrain sont disponibles.

En observant l'organigramme des charges de véhicules simulées sur chaque arc routier, présenté dans les images suivantes, il est possible de reconnaître certaines caractéristiques particulières du trafic affectant le réseau routier régional.

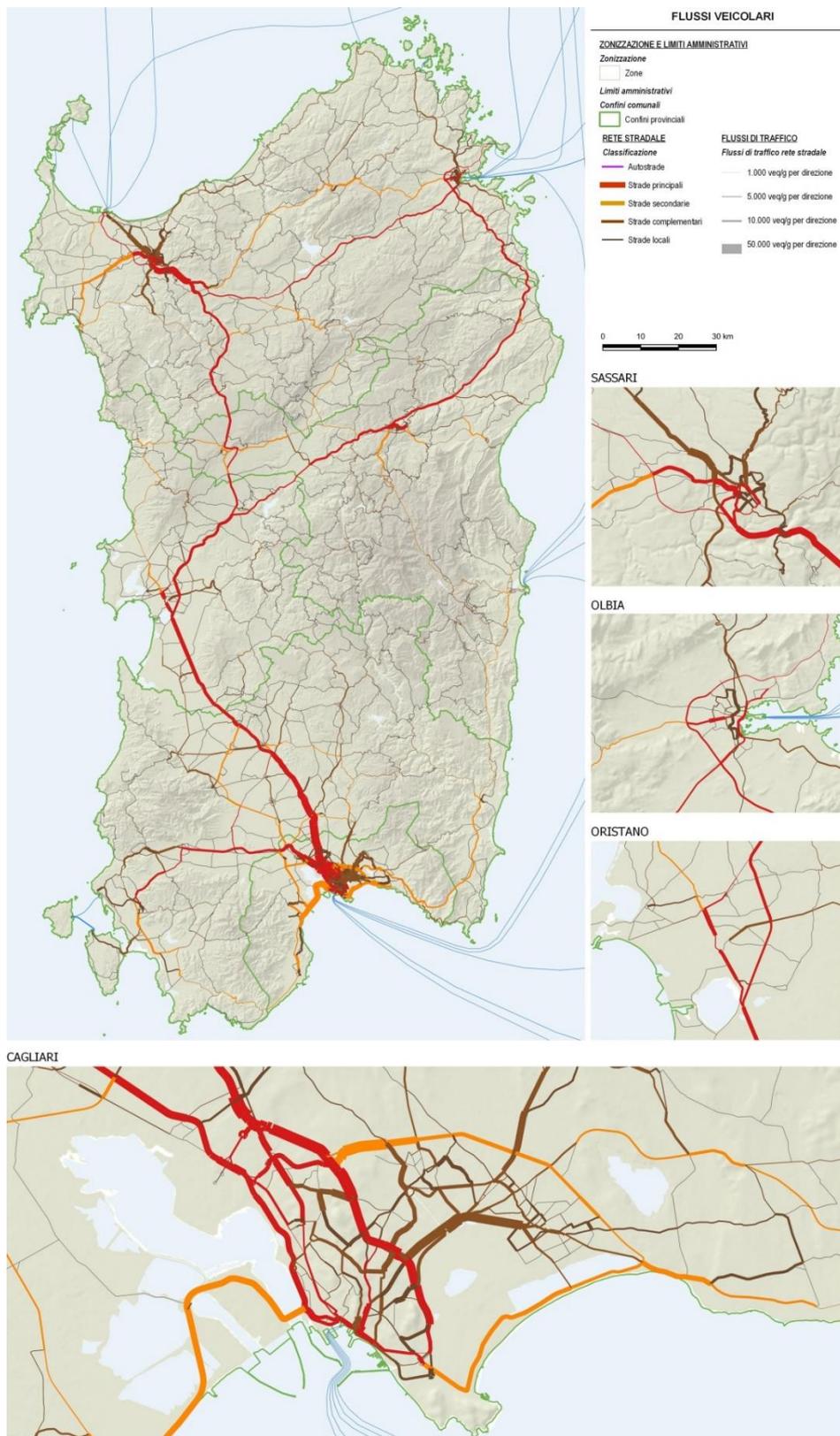
En particulier, il est évident que le trafic global de véhicules (**Figure 10**) se développe principalement dans la **Ville Métropolitaine de Cagliari**, tout d'abord à l'intérieur de la zone urbaine de manière diffuse et ensuite le long des principaux itinéraires suivants:

- En direction du nord : Oristano avec des jonctions intérieures relatives.
- En direction de l'ouest : Siliqua, Iglesias, Sant'Anna Arresi, Sant'Antioco.
- En direction de l'est : Villasimius avec continuation le long de la côte vers Arbatax.

Dans le nord de l'île, le trafic de véhicules légers se développe principalement dans la zone urbaine de **Sassari-Porto Torres-Alghero**, dans celle d'**Olbia** et **Nuoro** et le long des voies de liaison entre les trois pôles. Par rapport au système de Cagliari, les flux sont plus répartis dans le reste du réseau routier.

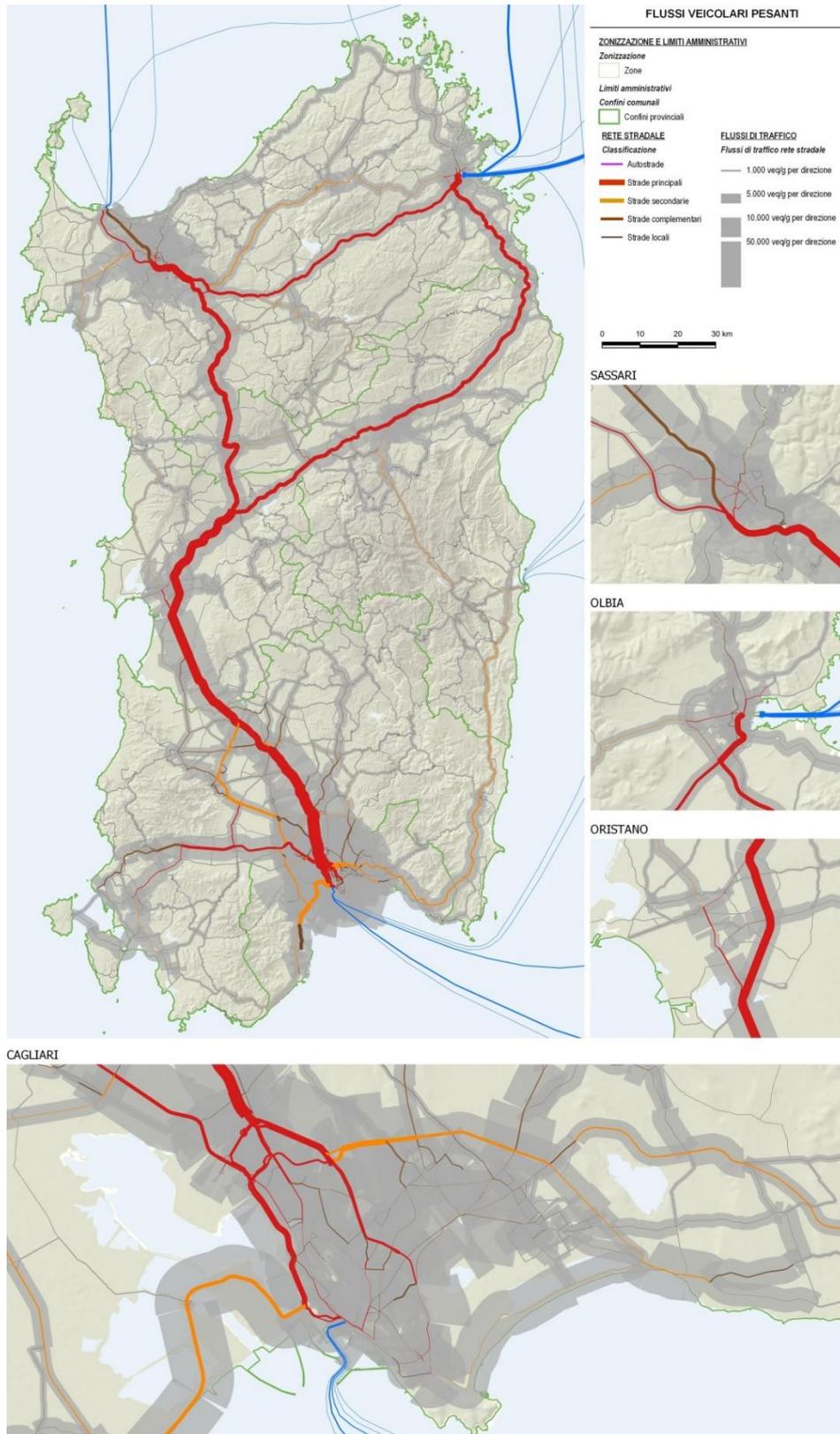
Le flux de camions (Figure 11) est concentré sur un ensemble limité d'infrastructures routières :

- La SS131 Carlo Felice s'avère être la route la plus chargée, en particulier dans le sud de l'île. Au nord, tout en conservant un rôle prépondérant, les flux sont en fait plus répartis
- le long de la route de contournement SS 126 Sud-Ouest de la Sardaigne
- le SS 131 DCN Diramazione Centrale Nuorese pour les liaisons Oristano-Olbia
- en direction de l'ouest, le long du premier tronçon de la route SS130 Iglesiasite jusqu'à la route SS293, à partir de laquelle les flux se divisent et continuent de diminuer
- en direction de Villasimius Est avec continuation le long de la côte en réduction constante jusqu'à Arbatax.



Source : TravailMETA

Figure 11. Total des flux de véhicules – état des faits



Source : TravailMETA

Figure 12. Flux des camions– état des faits

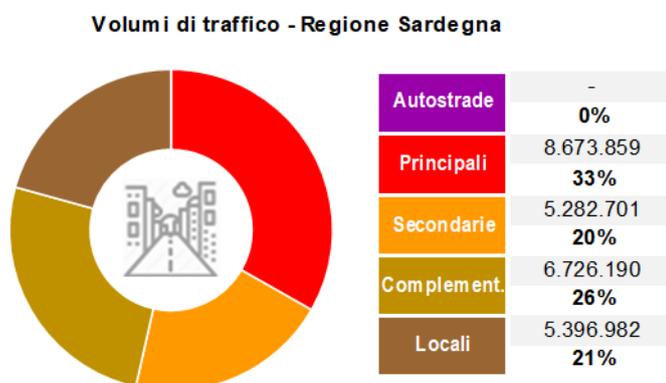
L'utilisation d'un modèle de simulation présente également l'avantage, qui n'est pas secondaire, de permettre l'extraction de statistiques agrégées, qui décrivent de manière synthétique la "quantité de trafic" présente et/ou attendue sur le territoire régional.

Ces statistiques sont exprimées selon deux grandeurs types, définies comme suit

- le **volume total du trafic**, correspondant à la somme des distances parcourues par tous les véhicules à l'intérieur de la zone d'étude pendant une période donnée, exprimé en véhicules x kilomètres quotidiens (*vkm/jour*)
- le **temps de parcours global**, correspondant à la somme des temps utilisés par chaque véhicule pour parcourir les arcs routiers, exprimé en véhicules x heure, également journaliers (*vh/jour*).

Le rapport entre ces deux indicateurs donne la vitesse moyenne d'écoulement sur le graphique, exprimée en $vkm : vh = km/h$.

Au niveau global, lors d'une journée "moyenne" (travail, hiver et école), 26 millions de véhicules équivalents*km/jour ont été simulés sur le réseau routier régional (**Figure 12** et **Tableau 3**). Ces flux sont concentrés dans une mesure similaire entre le réseau principal (33%) et le réseau complémentaire (26%). Les parts du réseau secondaire (20%) et du réseau local (21%) sont également similaires. Le nombre total de kilomètres parcourus s'élève à près de 440 mille véhicules*heure/jour, pour une vitesse moyenne de près de 60 km/h, avec des valeurs plus élevées sur le réseau principal (plus de 80 km/h), et des valeurs plus faibles sur le réseau local (40 km/h).



Source : Traitement META

Figure 13. Résumé des trajets globaux

VOLUMI E PERCORRENZE - Regione Sardegna				
CLASSE	Estesa	Volumi	Tempi	Velocità
	km	veq*km/giorno	veic *h/giorno	km/h
Principali	596	8.673.859	93.473	86,3
Secondarie	1.122	5.282.701	83.658	61,3
Complement.	2.052	6.726.190	131.893	50,3
Locali	3.937	5.396.982	128.789	41,4
Navigazione	1.259	593.774	20.008	29,7
TOTALE	8.965,5	26.079.731	437.813	59,6

Source : Traitement META

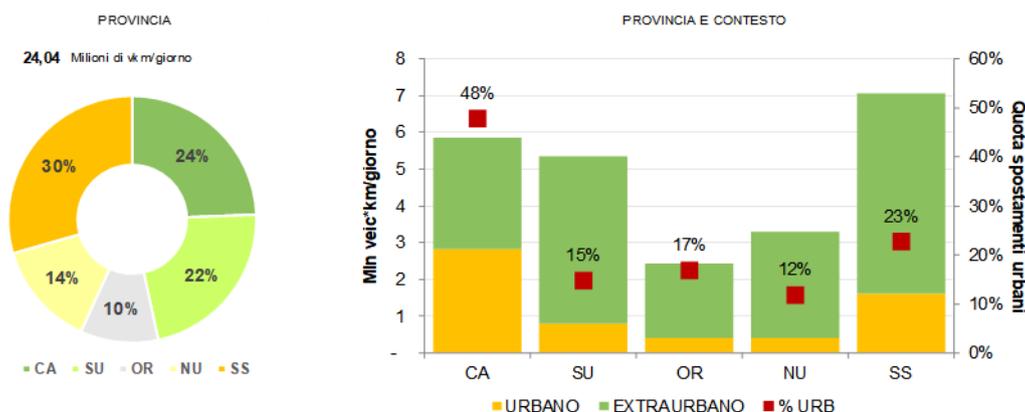
Tableau 4. Volumes et voyages

Ces statistiques peuvent également être ventilées par macro-catégorie de véhicules (légers/lourds), territoire traversé (provinces) et type de contexte (urbain/extra-urbain).

En ce qui concerne les **véhicules légers**, les 24 millions de véhicules*km/jour sont répartis dans des proportions similaires dans la province de Sassari (30%), dans la ville métropolitaine de Cagliari (24%) et dans la province de Sardaigne Sud (22%), tandis que les provinces de Nuoro (12%) et d'Oristano (10%) sont moins importantes. Dans la ville métropolitaine, presque la moitié des déplacements se font dans des zones urbaines (48%), un pourcentage qui tombe à moins d'un quart à Sassari (23%) et à des valeurs encore plus basses à Oristano (17%), au Sud de la Sardaigne (15%) et à Nuoro (12%).

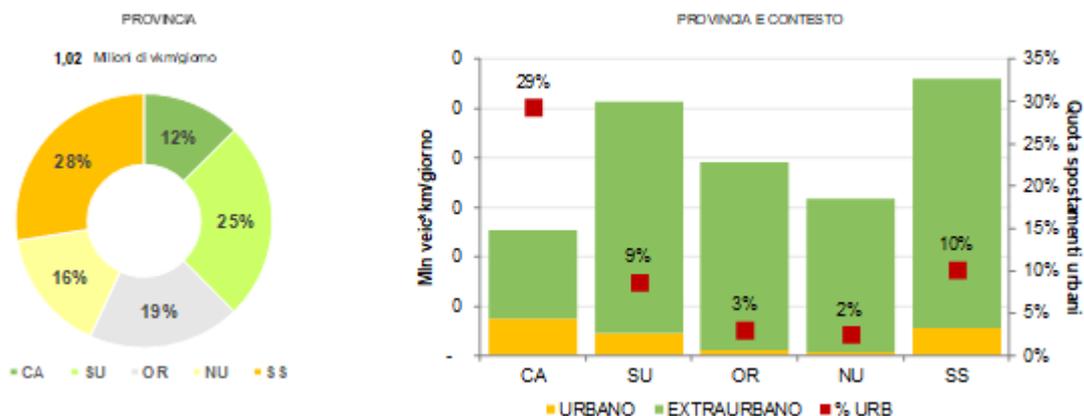
En ce qui concerne la répartition du kilométrage des **camions**, la principale province de référence reste Sassari (28%), suivie par la Sardaigne du Sud (25%), Oristano (19%), Nuoro (16%) et Cagliari (12%). L'incidence des déplacements urbains est beaucoup plus faible que dans le cas précédent, avec une valeur maximale de 29% à Cagliari et les autres cas inférieurs ou égaux à 10%.

Cette différence entre les véhicules légers et lourds confirme la différence de géographie des déplacements pour les deux catégories de véhicules, où les flux légers ont tendance à se concentrer sur les centres urbains, tandis que les flux lourds ont tendance à traverser toute l'île, en particulier en reliant Cagliari-Oristano-Sassari/Olbia..



Source : Traitement META

Figure 14. Répartition des trajets en véhicules légers



Source : Élaborations META

Figure 15. Répartition des trajets des camions

Pour obtenir une image globale des volumes et des temps de parcours, les statistiques déduites du réseau assigné sont finalement intégrées de manière paramétrique avec celles relatives aux mouvements intra-zonaux et aux entrées/sorties du réseau. Dans les deux cas, les longueurs et les temps de parcours moyens propres à chaque zone sont appliqués à la matrice.

Pour les **déplacements intra-zonaux**, la longueur moyenne est calculée comme la distance moyenne à vol d'oiseau entre les différentes sections de recensement de la zone. Les distances sont ensuite pondérées sur la base de la population vivant dans la zone (données 2011). En ce qui concerne les temps, ils sont calculés sur la base de la vitesse moyenne du réseau à l'intérieur de la zone, en excluant les infrastructures les plus performantes, caractérisées par une vocation plus interzonale. Cela représente près de 350 000 véh*km/jour et 8 000 véhicules*h/jour, pour une vitesse moyenne de près de 43 km/h.

En ce qui concerne les **coûts d'entrée/sortie**, les longueurs sont calculées sur la base de la distance moyenne des sections de recensement par rapport au connecteur de zone, tandis que les temps sont calculés comme dans le cas précédent. Cela donne près de 2,7 millions de véh*km/jour et 0,5 million de véh*h/jour, pour une vitesse moyenne d'environ 35 km/h (**Tableau 4**).

VOLUMI E PERCORRENZE - Regione Sardegna			
CLASSE	Volumi	Tempi	Velocità
	veq*km/giorno	veic*h/giorno	km/h
Rete simulata	26.079.731	437.813	59,6
Intrazonali	345.825	8.073	42,7
Ingresso/Egresso	2.691.546	75.491	35,3
TOTALE	29.117.103	521.377	53,9

Source : Traitement META

Tableau 5. Résumé du volume et voyage d'état

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 recherche peut être effectuée au moyen du 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 se produise sur celui-ci, et de l'entité des dommages potentiellement associés à un tel événement.

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

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 (Orso Giacone et al. 2012, Studer et al. 2012, 2018, Borghetti et al. 2015, Gandini et al. 2015).

En première approximation, la construction du coefficient de risque a été obtenue en comparant deux ensembles de données statistiques, attribuables respectivement :

- - aux niveaux d'accidents constatés sur le réseau routier sarde
- - la présence le long des arcs routiers simples, ou à leur proximité immédiate, de sujets potentiellement exposés, identifiés chez les automobilistes en transit, chez les riverains de la route, ainsi que dans les zones sensibles du point de vue naturaliste..

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) reconstruction 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 matériels⁵ ont été enregistrés ne sont pas pris en compte.

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 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,

⁵ Rappelons qu'un accident de la route est "un événement survenu dans des rues ou places ouvertes à la circulation, dans lequel sont impliqués des véhicules (ou des animaux) à l'arrêt ou en mouvement et qui entraîne des dommages corporels". ISTAT, Aspects méthodologiques de l'enquête. Enquête sur les accidents de la route avec dommages corporels.

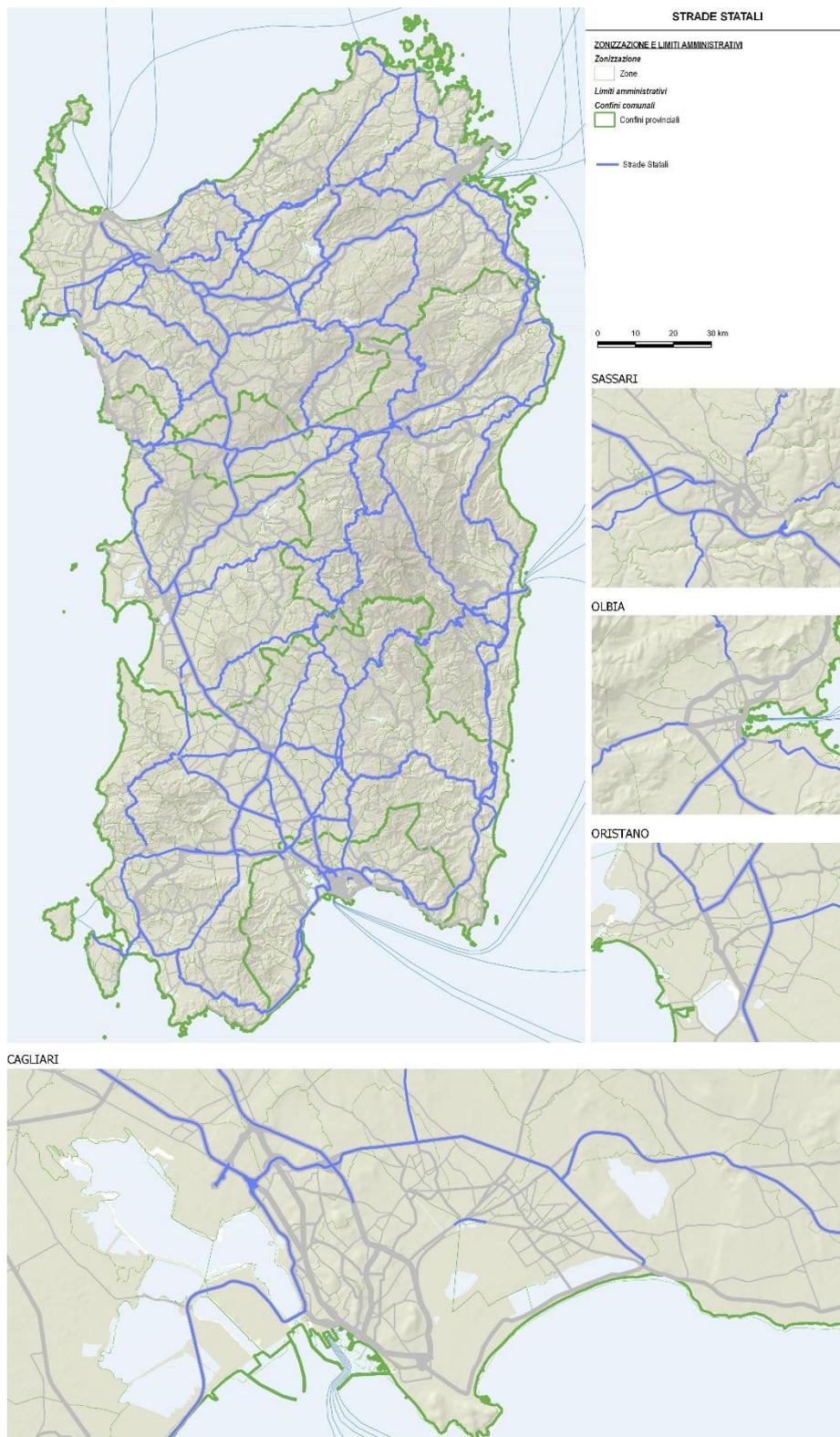
suburbaine, etc...), le sigle de la route (dont seule la partie numérique est reportée), le kilométrage progressif s'il est présent et la toponymie (cette dernière information n'est diffusée que jusqu'à l'année 2016 incluse).

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'enquête sur les seules routes nationales peut être considérée comme un bon compromis en ce qui concerne le risque d'accident, surtout si elle vise l'analyse du risque concernant les véhicules lourds, sans être trop onéreuse en termes de temps ou de coûts.

3.3 Codage 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 ISTAT⁶ (**Figure 17** et **Tableau 7**).

⁶ La principale source utilisée pour le codage des routes nationales est le graphique routier de l'ANAS, se référant à 2015 et disponible sur <http://dati.mit.gov.it/catalog/dataset/grafo-stradale-anas>.



Source : Élaborations META
 Figure 16. Répartition des trajets 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 6. Itinéraire par route d'État

Grâce à cette élaboration, il est également possible de faire une première évaluation du rôle assumé par le réseau des routes nationales sur le territoire régional. En particulier, 56% du kilométrage simulé est concentré sur ces routes, ce qui atteint 83% pour les seuls véhicules lourds (**Tableau 8**).

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 7. Concentration des flux sur le réseau routier de l'État

3.4 Calcul du nombre de véhicules impliqués dans des accidents par année

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 8, qui rapporte pour chaque route nationale 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	13111,8	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 8. Taux d'accidents, de dommages et de mortalité sur le réseau routier – tous les accidents

Les mêmes taux peuvent également être déterminés en se référant uniquement aux accidents impliquant au moins un véhicule lourd, comme le montre le Tableau 9. Dans ce cas, une variabilité encore plus grande apparaît, caractérisée par des pics sur les embranchements de routes importantes, comme la SS127bis et la SS129bis⁷, par rapport à 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 9. Taux d'accidents, de blessures et de décès sur le réseau routier - accidents impliquant des véhicules lourds

⁷ 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 la simulation de ceux effectués par les véhicules d'exploitation (véhicules d'entretien des routes, véhicules de collecte des déchets, etc.), non imputables à la matrice origine/destination, mais constituant de toute façon vraisemblablement une composante importante du flux sur les artères à moindre trafic.

3.5 Calcul du coefficient de risque pour la région de la Sardaigne

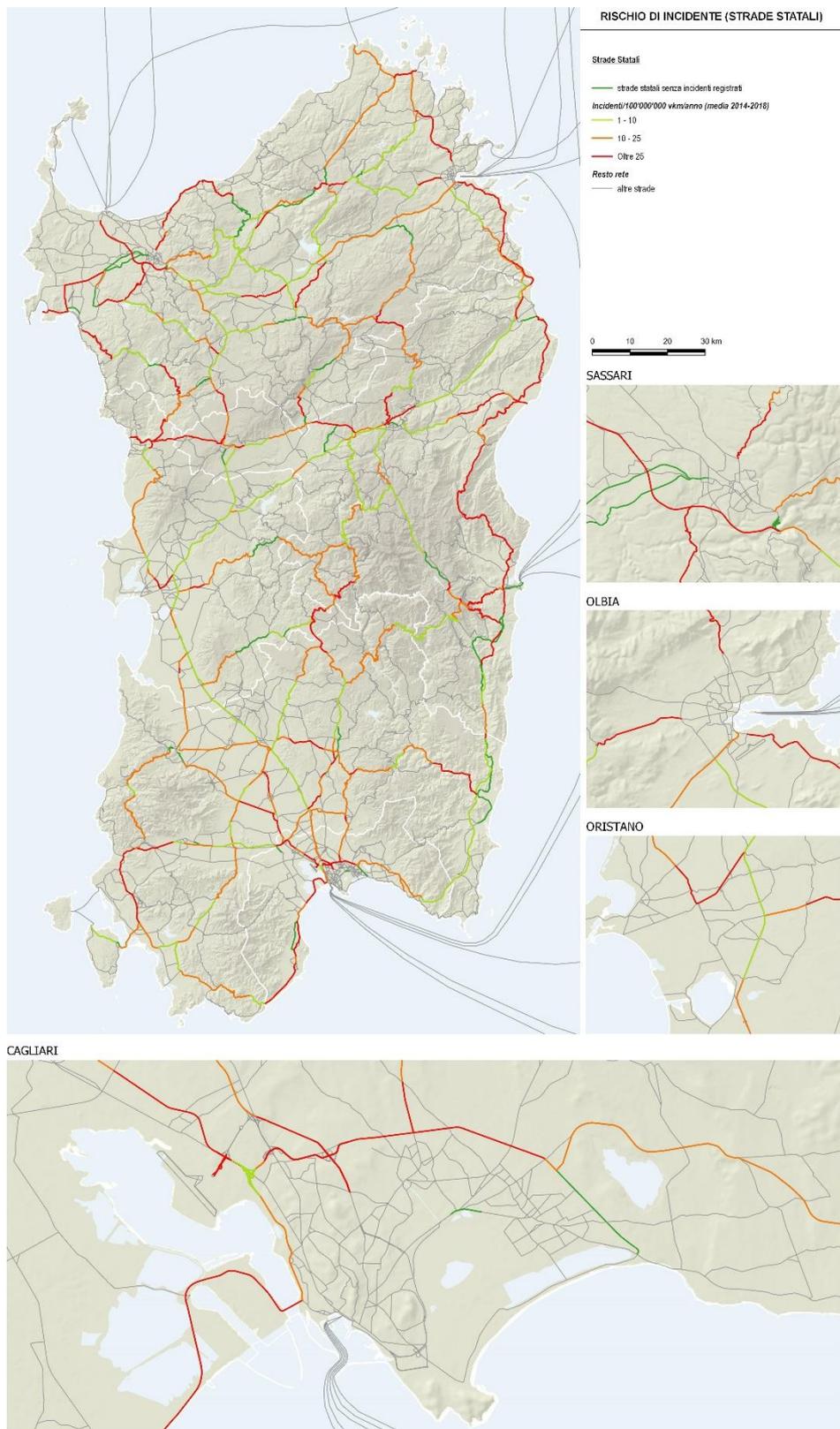
A partir des données décrites ci-dessus, et en particulier défini le modèle de trafic d'une part qui permet la reconstruction des itinéraires et les données sur les accidents d'autre part, il a été possible de définir un coefficient de risque utile pour définir les itinéraires potentiels induits par la distribution de GNL.

Comme on peut le voir sur l'image de la page suivante, pour toutes les routes nationales accidentées, le coefficient de risque a été calculé, puis représenté, pour faciliter la lecture, en trois classes :

- risque faible : $1 < \text{coefficient} < 10$ accidents pour 100 millions de vkm/an
- risque moyen : $10 < \text{coefficient} < 25$
- risque élevé : coefficient > 25

La carte montre une large répartition des risques sur l'ensemble du territoire. Si, d'une part, les arcs routiers présentant un risque moyennement élevé 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 court le long d'arcs routiers à l'intérieur de contextes urbains et/ou d'arcs routiers non étatiques (et donc non considérés dans l'activité en question), et qui sera défini avec une attention particulière..



Source : Traitement META

Figure 17. Identification du coefficient de risque

3. 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:

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

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 moments de la journée où le trafic est moins important et, d'autre part, que des systèmes d'alerte efficaces permettent de limiter la durée critique de l'événement aux seules phases précédant le démarrage de ces systèmes, avec la possibilité conséquente de bloquer le trafic sur l'axe routier examiné.

4.3 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.

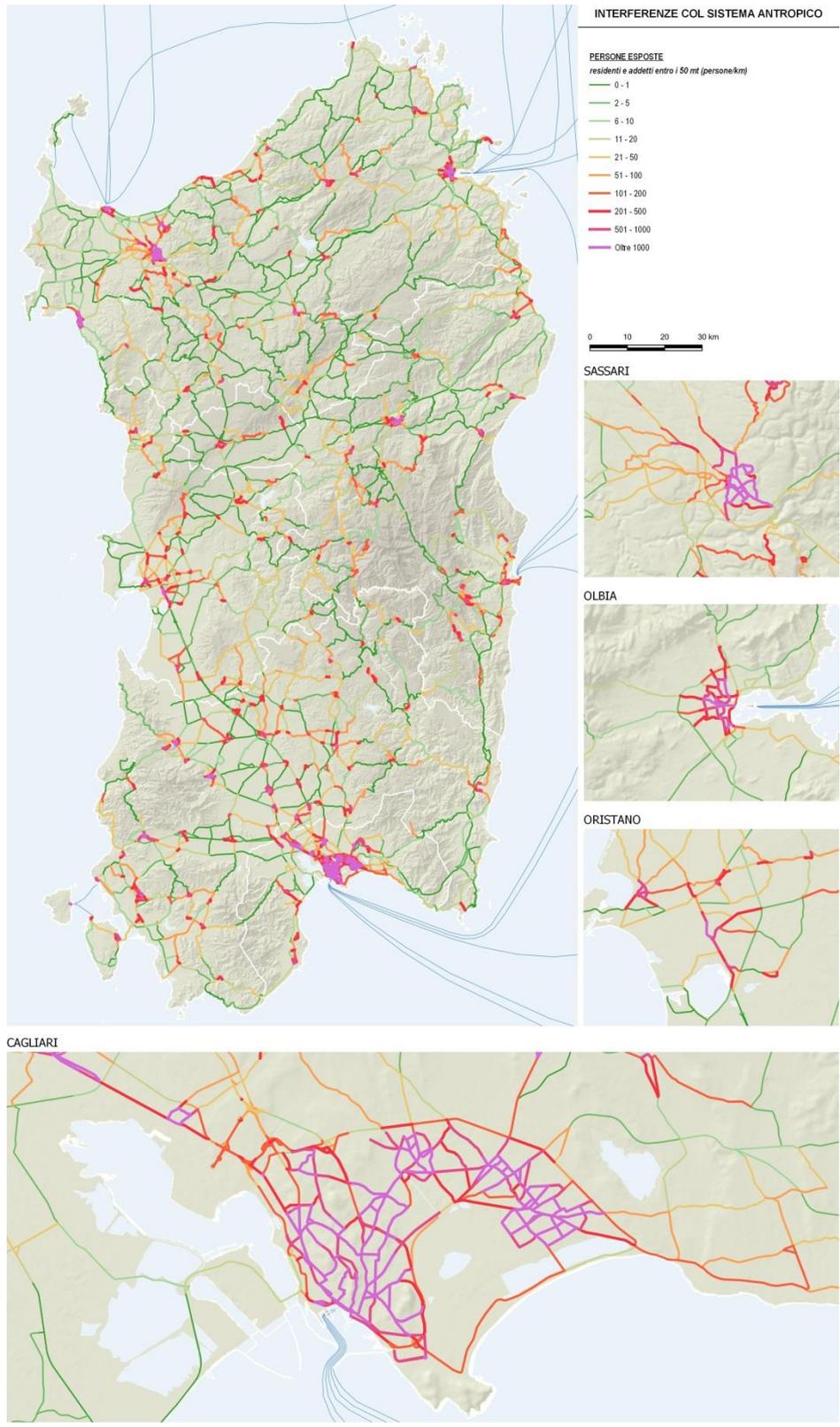
Sans entrer dans le détail des cas individuels, on peut faire référence à tous les accidents qui peuvent générer une fuite de liquides et/ou de gaz qui, selon le cas, peut se répandre dans l'air sur un certain nombre de mètres.

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 défini par l'image suivante, de mettre en évidence les arcs routiers sur lesquels la population exposée est plus importante qui, comme évident, sont concentrés principalement dans les zones urbaines des principales villes sardes.

Si, 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 de risque perçu, ainsi que d'influence sur le trafic local, l'indicateur souligne comment même le réseau principal, concentré principalement sur l'infrastructure suburbaine, traverse une petite concentration de population exposée, à prendre en compte dans le scénario de transport de GNL.

Si, d'une part, il n'y a pas de valeurs supérieures à 1000 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 une référence.



Source : Traitement META
 Figure 18. Identification de la population exposée

4.4 Éléments de vulnérabilité environnementale

Outre l'exposition humaine, l'exposition de l'environnement a également été prise en compte.

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

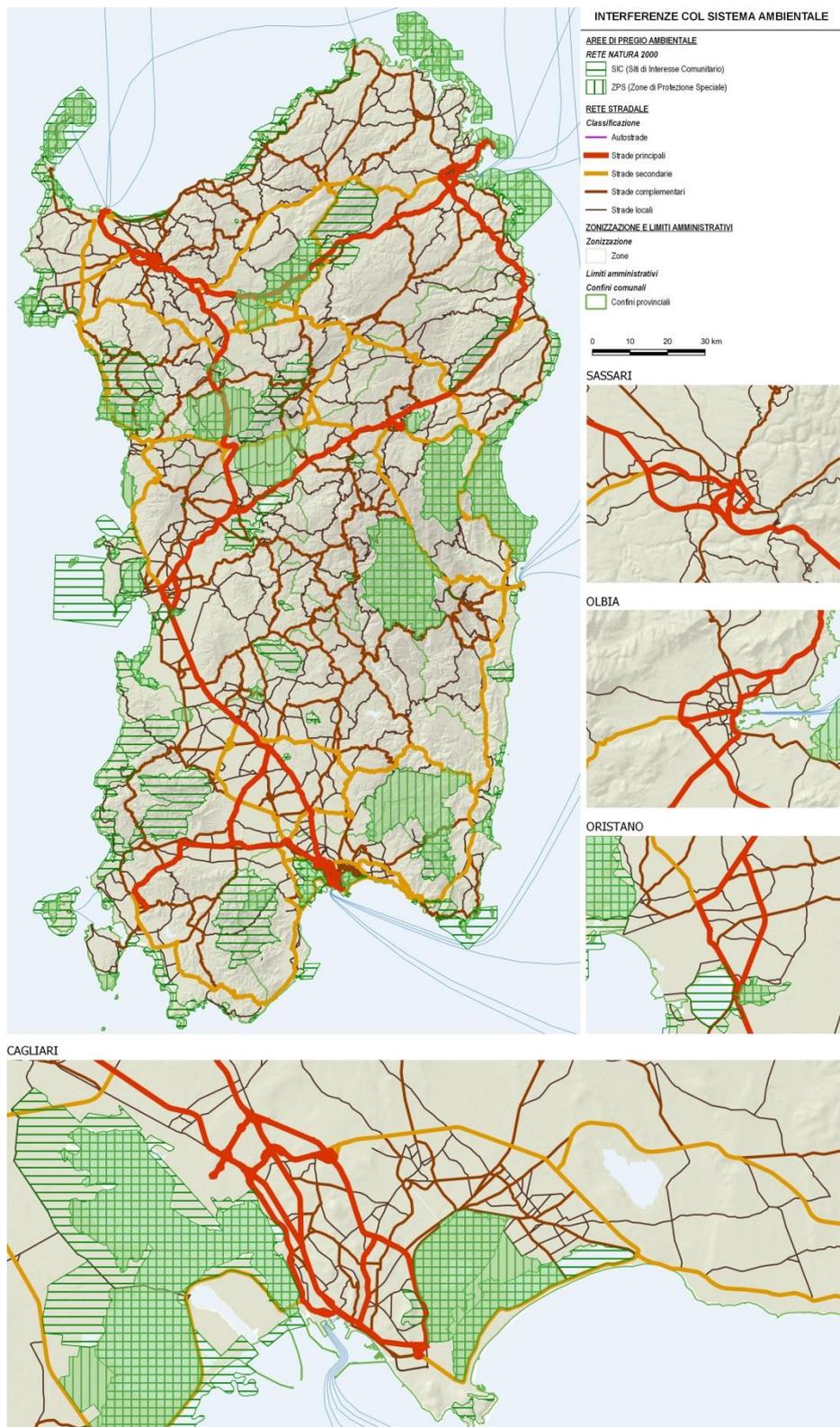
Cet indicateur suppose une cartographie des zones de valeur environnementale, où les effets des accidents avec propagation de liquide et/ou de gaz pourraient affecter les caractéristiques naturelles des environs.

Sans préjudice de la possibilité de disposer de données plus détaillées, les sites du réseau Natura2000 ont d'abord été considérés 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 présente sur le territoire de l'Union européenne.

Comme il est possible de l'observer dans l'image suivante, la plupart des infrastructures extra-urbaines sont manifestement concentrées en dehors des zones naturelles. Cependant, cela n'est pas valable pour tous les cas, en effet il est possible de remarquer que certaines des routes principales traversent également des zones protégées d'importance européenne.

Cela se produit en particulier 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 noter que certaines zones sont touchées par la sortie des points d'origine du GNL dans le port d'Oristano.



Source : Traitement META

Figure 19. Identification de la vulnérabilité environnementale

4.5 Résumé des résultats

Un résumé des résultats obtenus, en termes d'exposition au risque sur chaque route nationale, est présenté dans le Tableau 10.

Ces valeurs sont présentées sous 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..

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 SS128	CENTRALE SARDA	19.490	0	92
NSA371	EX S.S. N. 125 ORIENTALE SARD ^a	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 10. Exposition au risque accessoire dans la rue

4. Identification des routes à moindre risque

5.1 Minimisation des risques et itinéraires routiers

L'identification des itinéraires les moins risqués découle simplement

- de la combinaison, sur chaque arc routier, des facteurs relatifs à la probabilité accidentelle et à l'étendue potentielle des dommages en un coefficient de risque unique, représentant le "coût social" déterminé par le transit d'un camion-citerne cryogénique sur ce même arc.
- l'affectation des flux correspondants, des points d'origine (déchargement du GNL) à ceux de destination (points du réseau), selon les chemins de coût social minimum, associés au risque accidentel, qui peuvent évidemment différer des chemins optimaux du point de vue du coût de transport supporté par l'opérateur.

Finalement, l'équilibre peut être déterminé en considérant et en pondérant d'autres facteurs, tels que le coût généralisé du déplacement sur le réseau.

Cependant, l'équilibre devra également être trouvé en considérant d'autres facteurs:

5.2 Calcul des coefficients de risque

Comme déjà souligné au paragraphe 2 ci-dessus, le coefficient de risque relatif à chaque arc routier est obtenu en multipliant

- la probabilité d'un événement accidentel (exprimée en termes de cas défavorables pour 100 millions de véhicules lourds-km sur le réseau)
- les dommages potentiellement associés à cet événement (exprimés comme le coût social des *casualties* et des dommages environnementaux potentiellement induits par l'événement).

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

5.3 Affectation au réseau

La dernière étape de la procédure, qui sera illustrée dans le rapport T3.5, consiste en l'identification effective des routes à moindre risque associées au réseau de distribution du projet en Sardaigne.

Cette identification prendra comme point de départ la matrice O/D des mouvements d'approvisionnement nécessaires pour relier les lieux de déchargement du GNL à chaque point individuel du réseau. Cette matrice sera attribuée au réseau selon un simple algorithme statique AON (*All-Or-Nothing*), basé sur le coût social correspondant au coefficient de risque.

L'ensemble des arcs assignés renverra l'image des routes à risque minimum sur le réseau routier sarde, en relation avec 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, à l'intérieur de chaque zone de trafic, des choix d'itinéraires du "dernier kilomètre" qui, difficiles à définir à l'échelle de cette étude, devront être considérés en fonction des décisions prises quant au type de distributeurs

Bibliographie et sitographie

Borghetti F., Gandini P., Studer L., Todeschini V., Pastorelli G., 2015, Il 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

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.

Orso Giaccone 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



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 SIGNAL



Phase IV - Analyse de la fonctionnalité du réseau Livrable T3.4.1

Mars 2020



Sommaire

Objectifs	3
1 Base de données des flux de transport de GNL en PACA	3
1.1 Matrice origine – destination des flux GNL PACA	3
1.2 Sources utilisées et hypothèses	5
1.3 Les surcoûts du transport de GNL liés à la sécurité	6
1.4 Les autres impacts environnementaux : cas des Nox (oxydes d’azote)	7

Objectifs

Construire une base de données des flux actuels de transport de GNL et de leurs caractéristiques détaillées (en s'appuyant sur les résultats de la phase 1)

1 Base de données des flux de transport de GNL en PACA

1.1 Matrice origine – destination des flux GNL PACA

Cf. page suivante

Origine	Destination Pays	Destination Région	Mode de trspt	Distance moyenne (km)	Volume (tonnes)	Axe de trspt utilisé / point de sortie du territoire	Vitesse moyenne km/h (hors repos réglementaire)	Nbre de citernes annuelles	Fréquence moyenne mensuelle	Débit technique chargement / déchargement citerne (m3/h)	Débit réel chargement citerne au terminal (m3/h)	Débit réel déchargement citerne au point de livraison (m3/h)	Débit technique distribution GNL carburant (m3/h)	Débit réel distribution GNL carburant (m3/h)	Consommation PL standard (en L de gasoil) par trajet (A/R)	Consommation PL (en L de gasoil) annuel	Coût moyen du trspt (en €) par trajet (A/R)	Coût moyen du trspt (en k€) annuel	Emissions CO2 (en t) annuel	Part des livraisons en stations services	Economie de CO2 GNL carburant vs Diesel (en t/an)
Fos-surMer	France	Auvergne Rhône Alpes	Route	340	4080	Ouest - A154	60	215	18	80	34	43	9	4,5	218	46784	1020	219	124	40%	636
Fos-surMer	France	Auvergne Rhône Alpes	Route	340	3380	Nord - A7	60	178	15	80	34	43	9	4,5	218	38733	1020	182	103	40%	527
Fos-surMer	France	Bourgogne F-Comté	Route	440	1165	Nord - A7	70	61	5	80	34	43	9	4,5	282	17178	1320	81	45	55%	244
Fos-surMer	France	Bretagne	Route	1170	44	Ouest - A154	75	2	0,2	80	34	43	9	4,5	749	1498	3510	7	4	0%	0
Fos-surMer	France	Centre Val de Loire	Route	720	56	Nord - A7	70	3	0,3	80	34	43	9	4,5	461	1382	2160	6	4	0%	0
Fos-surMer	France	Hauts-deFrance	Route	930	40	Nord - A7	70	2	0,2	80	34	43	9	4,5	595	1190	2790	6	3	100%	14
Fos-surMer	France	Ile-de-France	Route	740	20	Nord - A7	70	1	0,1	80	34	43	9	4,5	474	474	2220	2	1	100%	7
Fos-surMer	France	Nouvelle Aquitaine	Route	730	64	Ouest - A154	70	3	0,3	80	34	43	9	4,5	467	1402	2190	7	4	0%	0
Fos-surMer	France	Occitanie	Route	230	8479	Ouest - A154	55	446	37	80	34	43	9	4,5	147	65651	690	308	174	4%	136
Fos-surMer	France	ProvenceAlpes-Côte d'Azur	Route	60	3052	Local	45	161	13	80	34	43	9	4,5	38	6182	180	29	16	50%	633
Fos-surMer	Italie	Abruzzo	Route	1010	2200	Est - A8	65	116	10	80	34	43	9	4,5	646	74982	3030	351	198	65%	472
Fos-surMer	Italie	Campania	Route	1120	3722	Est - A8	65	196	16	80	34	43	9	4,5	717	140493	3360	659	372	65%	775
Fos-surMer	Italie	Emilia Romagna	Route	700	21264	Est - A8	65	1119	93	80	34	43	9	4,5	448	501312	2100	2350	1327	65%	4946
Fos-surMer	Italie	Lazio	Route	920	6630	Est - A8	60	349	29	80	34	43	9	4,5	589	205491	2760	963	544	65%	1457
Fos-surMer	Italie	Lombardia	Route	540	9068	Est - A8	60	477	40	80	34	43	9	4,5	346	164851	1620	773	436	65%	2193
Fos-surMer	Italie	Marche	Route	920	7935	Est - A8	70	418	35	80	34	43	9	4,5	589	246118	2760	1154	651	65%	1744
Fos-surMer	Italie	Piemonte	Route	400	12341	Est - A8	50	650	54	80	34	43	9	4,5	256	166400	1200	780	440	65%	3085
Fos-surMer	Italie	Toscana	Route	660	4604	Est - A8	60	242	20	80	34	43	9	4,5	422	102221	1980	479	271	65%	1082
Fos-surMer	Italie	Trentino Alto Adige	Route	750	4465	Est - A8	65	235	20	80	34	43	9	4,5	480	112800	2250	529	299	65%	1026

Fos-surMer	Italie	Umbria	Route	800	4288	Est - A8	55	226	19	80	34	43	9	4,5	512	115712	2400	542	306	65%	972
Fos-surMer	Italie	Veneto	Route	800	21089	Est - A8	65	1110	93	80	34	43	9	4,5	512	568320	2400	2664	1504	65%	4783
Fos-surMer	Slovénie	Slovénie	Route	1000	750	Est - A8	65	39	3	80	34	43	9	4,5	640	24960	3000	117	66	65%	162
Fos-surMer	Suisse	Tessin	Route	670	360	Est - A8	60	19	1,6	80	34	43	9	4,5	429	8147	2010	38	22	65%	84
Fos-surMer	Macédoine	Macédoine	Route	1980	200	Est - A8	65	11	0,9	80	34	43	9	4,5	1267	13939	5940	65	37	65%	31

1.2 Sources utilisées et hypothèses

Données	Hypothèses / commentaires	Sources
Origine	Fos Tonkin et Fos Cavaou n'ont pas été différenciés, les deux terminaux étant proches géographiquement, et afin de ne pas complexifier la base de données	Elengy ¹
Destination - Pays	Données réelles (déclaration transporteurs)	Elengy
Destination - Région ²	Données réelles (déclaration transporteurs)	Elengy
Mode de trspt	Seule la route est utilisée sur le territoire PACA à ce jour pour le transport de GNL	Elengy
Distance moyenne (km) (aller simple)	Distance la plus pertinente entre distance avec la capitale de région et distance moyenne avec les points de destinations précis identifiés	Elengy, analyse See'Up
Volume (tonnes)	Volumes réels (données terminal GNL)	Elengy
Axe de trspt utilisé / point de sortie du territoire	Axe principal utilisé pour le transport de marchandise entre Fos et le point de sortie de territoire identifié	See'Up
Vitesse moyenne (hors repos réglementaire) (km/h)	Vitesse moyenne pour un véhicule léger particulier (source : google maps), auquel un facteur de 1,5 a été appliqué afin d'obtenir la vitesse moyenne pour un poids lourd	See'Up
Nombre de citernes annuelles	Calculé sur la base d'un chargement moyen de 21 t par citerne	Elengy, analyse See'Up
Fréquence mensuelle	Nombre annuel de citernes entre le terminal GNL et la région de destination	Analyse See'Up
Débit technique chargement / déchargement citerne (m3/h)	Débit permis par les installations	Elengy
Débit réel chargement citerne au terminal (m3/h)	Débit réel constaté aux terminaux (inclus les temps d'attente et d'entrée/sortie de site)	Elengy
Débit réel déchargement citerne au poin de livraison (m3/h)	Débit réel estimé au point de livraison (inclus les temps d'attente et d'entrée/sortie de site)	Estimation See'Up (absence de contrainte du site industrialoportuaire, donc plus rapide qu'au terminal GNL)
Débit technique distribution GNL carburant (m3/h)	Débit permis par les installations	Entretien See'Up
Débit réel distribution GNL carburant (m3/h)	Débit réel estimé au point de distribution	Estimation / entretien See'Up sur la base du temps moyen passé à la pompe
Consommation PL standard (en L de gasoil) par trajet (A/R)	Consommation moyenne d'une citerne 32 l/100km (chargée + à vide)	Comité National Routier, enquête TRM 2018

¹ Les données fournies par Elengy datent de 2019

² Le niveau de détail pour les destinations des flux de GNL en région PACA est à la maille de la région. Nous n'avons pas retenu une maille plus fine afin de préserver l'anonymat des clients (en particulier pour les flux à destination d'opérateurs privés autres que des stations-services).

Consommation PL (en L de gasoil) annuel	Consommation par trajet A/R x nbre de citernes annuelles	See'Up
Coût moyen du trspt (en €) par trajet A/R	Coût moyen du transport de marchandise en citerne (point de vue du transporteur routier) : 1,5 €/km ³ .	Comité National Routier (calculateur de coût)

	Il s'agit d'un coût moyen : pour les longues distances, ce coût est plus élevé (horaires de nuit, coût d'un 2 ^e chauffeur ou coût d'une nuit d'hôtel) ; pour les courtes distances, ce coût est plus faible. A noter : du point de vue du client, ce coût se rapproche plutôt de 3€/km car le transporteur vend au client un aller simple mais supporte le coût d'un aller-retour.	
Coût moyen du trspt (en k€) annuel	Coût moyen du transport par trajet A/R x nbre de citernes annuelles	See'Up
Emissions CO2 (en kg) annuelles	Emission par un tracteur + semi-remorque citerne : 2,647 kg par litre de gasoil consommé	Futura-sciences.com (sur la base de la réaction chimique de combustion du diesel)
Part des stations-services	Part des stations-services dans le volumes total de livraison de GNL dans la région concernée au regard de tous les types de clients (industriels, agriculteurs en particulier)	Elengy, analyse See'Up
Economie de CO2 GNL carburant vs Diesel (en t)	Réduction de CO2 générée par l'utilisation du GNL carburant distribué par les stations approvisionnées depuis les terminaux de Fos ; comparativement à une situation théorique où les PL GNL sont remplacés par des PL diesel ⁴ . Hypothèse de calcul : sur la base de la consommation moyenne des PL diesel et des PL GNL, 1 t de GNL est équivalent à 0,9 t de diesel. Hypothèse d'émission de CO2 par le GNL : -15% « du puits à la roue »	Gaz-mobilite.fr Analyses See'Up

1.3 Les surcoûts du transport de GNL liés à la sécurité

Il s'agit ici de mettre en évidence uniquement les coûts associés au transport de GNL en particulier. En effet, le GNL, en tant que marchandise dangereuse, supporte également les coûts spécifiques liés à ce type de marchandise.

Le transport de Matière Dangereuse est encadré par deux réglementations:

- L'ADR (Accord Européen relatif au transport international des Marchandises Dangereuses par Route). Le coût de formation ADR est de 350€/chauffeur environ.
- L'arrêté TMD (Transport de Matières Dangereuses), qui reprend notamment les termes de l'ADR dans la réglementation nationale.

³ Le coût moyen sectoriel 2018 est de 1,264 €/km. Le coût de transport en citerne est effectivement plus élevé en

⁴ Nous n'avons pas considéré ici les économies de CO2 générés par les autres usages que le GNL carburant. En effet, ne connaissant pas les usages précis du GNL dans ce cas, cela ne permet pas de définir une base de comparaison avec une autre énergie.

Les coûts liés à la sécurité spécifiques au transport de GNL peuvent être décomposés en deux types de coûts:

- La formation des chauffeurs
- Les équipements

Les éléments ci-après sont notamment extraits de la Charte « Sécurité et bonnes pratiques dans le transport routier du Gaz Naturel Liquéfié » émise par l'AFG (association française du gaz), mise à jour en mars 2019.

moyenne que le coût moyen sectoriel mais varie à la baisse en cas de distance plus élevée et à la hausse en cas de distance plus courte. Ces résultats fortement différenciés en fonction de la distance parcourue montrent que l'utilisation exclusive d'un ratio de coût kilométrique peut générer des biais dans l'analyse de la rentabilité d'une opération particulière (ce qui n'est pas l'objet de la présente analyse). Un ratio kilométrique simple ne tient en effet pas compte des spécificités de chaque transport, dont le temps est la composante principale (temps d'attente, congestion routière, etc.).

Formation:

A ce jour, la formation des chauffeurs pour le chargement et le déchargement de GNL est généralement gratuite. En effet, elle est considérée comme un investissement pour les distributeurs (opérateurs de terminaux et de stations) qui réduisent ainsi le coût de la non-qualité et le coût des accidents évités. Il s'agit d'une formation allant de 4h à 1 journée.

Les conducteurs doivent suivre une mise à jour de la formation tous les 3 ans.

La formation comporte en particulier les éléments suivants :

- Contexte, introduction au GNL
- Le Produit GNL
- Procédure de chargement
- Transport routier
- Procédure de déchargement
- Procédure d'urgence : risques et conduites à tenir

Des formations plus approfondies relatives au GNL, en particulier dédiées à l'utilisation des moyens de lutte incendie, existent également pour un prix d'environ 1000€/personne.

Equipements:

Au-delà des équipements habituels pour le transport de matières dangereuses, les équipements suivants sont requis:

- Véhicules:
 - o Les citernes doivent être de type double parois isolées par le vide (coût d'une citerne neuve: 250 k€)
 - o Systèmes de sécurité spécifiques (arrêt d'urgence, obturation, anti-arrachement, dispositif « homme mort », raccord spécifique)
- Personnel:
 - o Port des EPI imposés par la réglementation lors des opérations de chargement / déchargement
 - o EPI spécifiques : casque équipé d'un écran facial et d'une jugulaire, vêtement couvrant antistatique, chaussures de sécurité antistatiques, gants de protection cryogénique
 - o Explosimètre portable

1.4 Les autres impacts environnementaux : cas des Nox (oxydes d'azote)

Au-delà des émissions de gaz à effet de serre (CO₂), des études et données disponibles à ce jour permettent de mettre en évidence les émissions de NO_x par les motorisations GNL, qui sont parmi les polluants principaux issus du transport routier.

En particulier le projet « Equilibre⁵ » met en évidence une forte réduction des NO_x par les poids lourds à motorisation GNV. Selon le contexte de circulation des poids lourds, les émissions de NO_x par les PL 44 t au GNL sont de 39% à 64% inférieures aux émissions de NO_x par les PL 44 t au diesel (cf. graphe ci-dessous).

A noter : le chiffrage précis des externalités liées à l'usage de véhicules au GNL comparativement à l'usage de véhicules au diesel nécessiterait une étude spécifique dédiée (ce qui n'est pas l'objet de la présente étude).

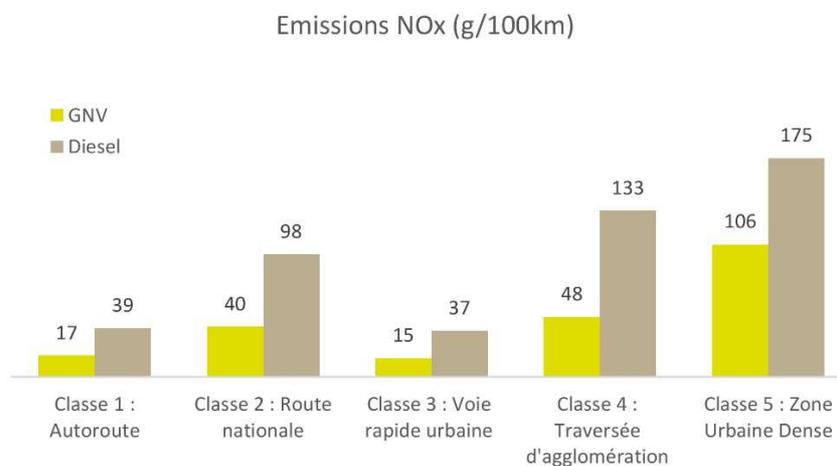


Figure 1 - Emissions de NO_x par les PL 44 tonnes (source : Projet Equilibre, 2018)

⁵ Le projet « Equilibre », étude indépendante et labélisée par le pôle de compétitivité CARA, a été menée à l'initiative d'un consortium de transporteurs et s'appuie sur l'expertise du CRMT (sociétés apportant des solutions techniques pour les véhicules au GNV) pour l'instrumentation des véhicules et sur celle de l'IFSTTAR pour l'exploitation des données. Dans le cadre de ce projet, les données de 12 poids lourds de 19 à 44 t ont fait l'objet d'un traitement, afin de mesurer les consommations et les émissions de CO₂ et NO_x de poids-lourds GNV et Diesel.