

PERSPECTIVES MONDIALES DE LA CONNECTIVITÉ ET SOLUTIONS D'ENTRETIEN DES ROUTES RURALES: L'ENVIRONNEMENT DES PARCS NATURELS EN ITALIE COMME CAS EUROPÉENNES ET EN COLOMBIE COMME UN CAS POUR L'AMÉRIQUE LATINE

GILBERTO MARTINEZ ARGUELLES & PAOLA VILLANI
Politecnico di Milano

CT 2.5 Réseaux de routes rurales et accessibilité (AIPCR Italie)
gilberto.martinez@mail.polimi.it paola.villani@polimi.it

RESUME¹

Dans le titre, l'expression « routes » signifie que tous les chemins du Comité Technique 2.5 sont routes à l'extérieur de milieu urbaine et, pour l'Italie ces routes sont classifiés dans la catégorie C ou dans la catégorie F, ces dernières avec un largeur proche à 6 mt ou 6.50 mt mais dans la catégorie routes rurales – en Italie - il y a aussi toutes les routes qui ne sont pas classés. Par conséquent, dans le Comité Technique 2.5 il y a la présence de une dénomination double « Strade locali extraurbane » pour identifier toutes les routes qui relient les agglomérations urbaines secondaires entre elles et entre celles-ci et les villes principales mais aussi toutes les routes liant les agglomérations rurales entre elles et avec les centres urbains à proximité, ou encore liaisons secondaires entre petites agglomérations urbaines ou. Dénomination qui vise à systématiser le corpus de connaissances sur les routes secondaires.

Dans tout le monde milliards d'euros sont le budget que chaque année les collectivités destinent à l'entretien de leurs routes secondaires. On doit faire quelque consideration sur le coût d'un kilomètre de route et l'analyse de son cycle de vie. Chaque route impacte au niveau économique et environnemental.

1. EXAMEN DES CRITERES DE DEVELOPPEMENT DURABLE ET L'ENTRETIEN DES ROUTES RURALES

1.1. Dénomination qui vise à systématiser le corpus de connaissances sur les routes secondaires

Dans le titre, l'expression « routes » signifie que tous les chemins du Comité Technique 2.5 sont routes à l'extérieur de milieu urbaine et, pour l'Italie ces routes sont classifiés dans la catégorie F, avec un largeur proche à 6 mt ou 6.50 mt mais dans la catégorie routes rurales de catégorie F – en Italie - il y a aussi toutes les routes qui sont classés comme routes secondaires et qui ne peuvent pas être classifié comme catégorie C pour largeur (<7 mt) et pour l'absence de plateformes latérales et, pour conséquent, dans le Comité Technique 2.5 il y a la présence de une dénomination double « Strade locali extraurbane » pour identifier toutes les routes qui relient les agglomérations urbaines secondaires entre elles et entre celles-ci et les villes principales mais aussi toutes les

¹ Gilberto Martinez Arguelles c'est l'écrivain des paragraphes 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6 ; Paola Villani c'est l'écrivaine des paragraphes 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3., 4, 4.1 et 5.

routes liant les agglomérations rurales entre elles et avec les centres urbains à proximité, ou encore liaisons secondaires entre petites agglomérations urbaines.

2. Les routes dans l'environnement des parcs naturels

2.1. Route dans le parc de Sibolla à Altopascio (Lucca), Italie

Le Parc naturel de Sibolla c'est à Altopascio dans la Province de Lucques, une des provinces italiennes de la Toscane. À l'ouest, il y a la mer Tyrrhénienne, à l'est la province de Pistoia et la province de Florence, au sud la province de Pise. Trois zones principales caractérisent ce vaste territoire qui est ainsi réparti: Plaine de Lucques, Garfagnana et Versilia. Très vieille terre, fortement peuplée et franchi antérieurement à l'époque des Romains, mais encore plus développée au moyen-âge parce que le Roy Lothaire Ier connectait toute l'Europe par différentes routes, dont les plus connues sont la route Cassia et la Francigena. Et le mot *franchi*, qui se trouve dans la dénomination de route *Francigena* signifie « libérer, affranchir » « accorder quelque chose à quelqu'un » « passer par-dessus », « aller au-delà de une limite », « libérer quelqu'un d'une charge » (car ici il y avait beaucoup de channeau et des fleuves et la voie était une voie sur l'eau). Toute la région est riche de préexistences historiques et archéologiques et dans l'actuel réseau routier européenne il y a beaucoup de voies principales, tant que de villages et de villes, qui sont connectés à la route Francigena. Normal que la construction d'une route à Altopascio a demandé une attention particulière à l'environnement.

Dans le parc de Sibolla on a utilisé un système géogrilles extrudées de renfort pour stabiliser le sol de fondation.



Figure 1 : système géogrilles à Altopascio

Quand les granulats sont étalés et compactés au-dessus des géogrilles de renforcement, les granules de terrain pénètrent en partie dans les ouvertures de la grille et restent « coincés » en créant ainsi un encastrement efficace et solide tout au long du plan de la géogrille. Ce mécanisme d'encastrement est indispensable pour le comportement du géosynthétique de renforcement. En effet, il permet à la géogrille de contraster les mouvements horizontaux du granulat en augmentant l'efficacité de l'enrobé, en assurant une prévention contre les affaissements et contre les sillons.

La mise en oeuvre du matériau s'effectue par simple versement depuis un camion toupie dans la fouille, suivi d'un traitement manuel léger qui dépend de l'état de surface souhaité (lisse ou rugueux). L'agitation de gauche à droite de la goulotte de la toupie favorise la mise en place du matériau notamment lorsque la teneur en eau a été réduite pour pouvoir tenir des pentes élevées. Leur caractère autocompactant permet de les mettre en oeuvre dans des tranchées de faible largeur et à une cadence importante.

Pour sa rapidité d'exécution, sa durabilité et sa compétitivité économique, un matériel autocompactant peut être préférable.

Ils sont des matériaux spécialement élaborés pour ne pas nécessiter de compactage lors de leur mise en oeuvre. Ce sont des mélanges de granulats (sables, gravillons, fillers, etc.), de ciment, d'eau et d'adjuvants.

Il s'agit de matériaux qui se mettent en place naturellement, par simple déversement, sans compactage ni vibration. Ils assurent en quelques heures une stabilité suffisante permettant une remise en circulation rapide. Ils présentent à long terme des résistances mécaniques adaptées à l'usage.

Les produits essorables utilisent le principe des remblais hydrauliques. La fluidité nécessaire à leur mise en oeuvre est assurée par une teneur initiale en eau élevée. Leur stabilité et leur capacité portante sont obtenues essentiellement par l'évacuation d'une forte partie de cette eau (40 à 50 %) dans les matériaux encaissants, par l'empilement optimal des granulats et par la prise et le durcissement du ciment. Sauf dispositions spéciales, leur utilisation est limitée aux matériaux encaissants suffisamment perméables.

2.2. Route à Cortina d'Ampezzo (Veneto, Italie)

Cortina d'Ampezzo c'est dans les Alpes, une chaîne de montagnes qui recouvre la frontière nord de l'Italie. Le cas de Cortina d'Ampezzo c'est relatif au retraitement en place au ciment du corps de l'ancienne chaussée: une solution qui utilise la stabilité résiduelle de la fondation et les matériaux existants du squelette en place. Les matériaux autocompactants utilisés sont des matériaux spécialement élaborés pour ne pas nécessiter de compactage lors de leur mise en oeuvre. Ils assurent en quelques heures une stabilité suffisante permettant une remise en circulation rapide. Ils présentent à long terme des résistances mécaniques adaptées à l'usage. C'est un produit essorable qui utilise le principe des remblais hydrauliques. La fluidité nécessaire à la mise en oeuvre c'est assurée par une teneur initiale en eau élevée. La stabilité et la capacité portante sont obtenues essentiellement par l'évacuation d'une forte partie de cette eau (40 à 50 %) dans les matériaux encaissants, par l'empilement optimal des granulats et par la prise et le durcissement du ciment. Sauf dispositions spéciales, leur utilisation est limitée aux matériaux encaissants suffisamment perméables. Les performances mécaniques et porosité du matériau sont suffisantes pour le considérer *a priori* comme « non gélif ».

Le choix de ce matériau à Cortina d'Ampezzo est également dû au fait que les chaussées rigides ne sont pas affectées par les conditions environnementales. Ce matériau est stabilisé sur place par l'ajout d'émulsion de l'asphalte et placés sur des surfaces en asphalte en pleine épaisseur ou confirmé (profondeur maximale) sur le terrain naturel.

C'est un matériau avec trois composants, à base de produits pour la stabilisation, la réparation et la restauration de pavage de route en général. Comme pour les bétons

traditionnels, ce produit ne doit pas être mis en oeuvre quand il y a des températures ambiantes inférieures à 5 °C. Le matériau est versé directement du camion malaxeur et à mesure de la progression du camion. Pour éviter la ségrégation, il convient de limiter la hauteur de chute depuis la goulotte. La mise en oeuvre nécessite un ouvrier qui guide la goulotte de déversement dans la tranchée et un autre qui égalise la surface.



Figure 2: route à Cortina d'Ampezzo, machine à paver

Ce matériau, destiné à la réalisation d'assises de chaussées, combine caractère autoplaçant, acquisition de portance rapide et caractéristiques mécaniques équivalentes à une grave ciment de type G2 à G3. Une formule typique comprend un squelette granulaire de diamètre maximal 14 à 20 mm, un dosage en ciment de 140 kg/m³ et une teneur en eau (efficace) d'environ 200 l/m³. Ces matériaux peuvent se substituer avantageusement aux graves traitées pour les raisons suivantes, du fait de l'absence de compactage nécessaire: mise en oeuvre sur sols peu porteurs, dans des zones étroites où le compactage est difficile, possibilité de réaliser des couches épaisses en une seule fois.

Les surfaces de béton mis en œuvre sont traitées chimiquement ou mécaniquement quand ils sont encore frais afin d'améliorer les caractéristiques d'adhérence. Les techniques les plus courantes se composent de brossage et de traitement avec des agents ignifuges. Le brossage ou la rayure à la surface de chaussée c'est dans le sens longitudinal transversal à la direction de voie avec équipement mécanisée choisi selon le degré de rugosité.

Le produit spécifique ici utilisé doit être ajoutée à chaque mt³ d'inertes sélectionnés et contient anhydride maléique qui se présente généralement sous la forme de cristaux blancs transparents. L'anhydride maléique peut être obtenu par déshydratation de l'acide maléique (si hydraté, il donne l'acide maléique). Il a longtemps été synthétisé par oxydation du benzène ou d'autres composés aromatiques mais aujourd'hui ce matériel c'est majoritairement synthétisé par oxydation du butane grâce à des catalyseurs de type

VPO (oxyde mixte de vanadium et de phosphore). Anhydride maléique a longtemps été utilisé comme additif pour aggraffante fonctionnalisation des polyoléfines par la forte réactivité du groupe anhydridico. L' anhydride maléique explique tout sa fonctionnalisation sur matériaux polymères, en vue de modifier certaines propriétés y compris le point d'amure. Dans certaines études, on remarque une augmentation du pourcentage de l'anhydride maléique, introduit dans la matrice polymère, conduit à une réduction des angles de contact avec l'eau. En d'autres termes, la présence d'anhydride maléique semble augmenter la polarité de surface en matériaux tels que le polyéthylène basse densité (sigle PEBD ou LDPE de Low-density polyethylene en anglais) et le polyéthylène à basse densité linéaire (sigle PEBDL ou LLDPE de Linear low-density polyethylene en anglais). L' anhydride maléique agit également comme agent de-nucleante et apporte une augmentation de la capacité de cristallisation. Mais sommes nous sûrs que c'est une bonne idée de l'utiliser de anhydride maléique pour le pavage des routes, routes qui sont sous réserve de la lixiviation continue car il y a des préoccupations concernant les effets nocifs de benzène sur la santé et la possibilité de contamination des nappes phréatiques qui ont conduit à la mise en place d'une réglementation stricte ?

Le materiau utilisé à Cortina d'Ampezzo à un vaste domaine d'emploi : c'est très utilisé pour les petites voiries à faible et moyen trafic, les zones piétonnes avec accès livraison par camions, les pistes cyclables et pour les aires de parking poids lourds, et répond principalement aux qualités intrinsèques suivantes:

- insensibilité aux phénomènes de poinçonnement ou d'orniérage quelle que soit la température,
- insensibilité aux hydrocarbures ou solvants de toutes sortes,
- possibilité de traitement spécifique de surface : balayage, striage, bouchardage, désactivation,
- coloration dans la masse éventuelle avec toute possibilité de teinte.

Les revêtements de sol rigides ne sont pas affectés par les conditions environnementales.

2.3. Route dans le parc de Sumapaz (Colombie)

La République de Colombie a organisé un complexe « Système National d'aires protégées» (SINAP) qui a un élément très important dans tout le pays car le «Système del Parques Nacionales Naturales » (SPNN), dispose de 56 parcs naturels, avec une étendue de 126.023,21 km² qui représentent plus de 11,04 % du territoire continental colombien. Pour entretenir son réseau d'infrastructures dans, ou vers, les principaux parcs naturels, la Colombie utilise le stock de matériel de fraisage. À Bogota, le fraisage est obtenu de l'entretien des routes des villes, fraisage qui, si n'est pas implémenté dans la même œuvre

au milieu urbaine sous forme de recyclage (in situ) est transporté à l'un des lots ou aires de stockage. Ce matériel est contrôlé et c'est délivré un certificat avec le volume de matières transportées qui fait partie de la composante technique et environnementale des entrepreneurs de travaux publics dans le District de Bogotá. Les lots conservés des volumes en stock allant de 40 000 m³ à 100 000 m³. Cette c'est l'origine de la matière de fraisage (RAP) utilisé pour l'entretien des routes menant au Parc National Sumapaz (PNS). Le Parc est situé sur la Cordillère orientale, à quelques heures de Bogota, on accède au parc le long de la route qui mène à Usme et San Juan de Sumapaz. Le Páramo de Sumapaz c'est un écosystémiques particulier avec des altitudes entre 1600 et 4000 mètres.

Ce document décrit l'expérience et le processus constructif utilisé pour la conservation des chemins ou des routes rurales appliquées sur les voies qui mènent à la PNS utilisant du matériel fraisat. Ce matériel fraisat (asphalte et agrégats) c'est l'ensemble des matériaux supprimés et/ou générées après le broyage et la coupe d'une chaussée souple (asphalte) avec un équipement spécifiques et la rectification «Fraiseuse». Lorsqu'il est correctement broyée et contrôlée, une chaussée avec matériaux recyclés, en anglais acronyme de Recycled Asphalt Pavement (RAP), fournit une chaussée de haute qualité. Dans la localité de Sumapaz il y a 296 Km des routes, mais pour l'année 2008le 87 % se presentait en mauvais état. Plus de 50 km de route a été entretenue avec le matériel de fraisage grace à des contrats et accords signés par le maire Local de Sumapaz, travaux qui ont considérablement amélioré les conditions d'accessibilité et la qualité de vie des habitants.

2.3.1 Le processus de construction de l'utilisation de fraisage stabilisé avec émulsion de bitume comme une solution pour l'entretien des routes rurales dans le parc naturel de Sumapaz (PNS).

Le fraisage est stabilisé avec asphalte émulsion et c'est appliquée sous la forme de la profondeur de la couche complète c'est à dire « toute son épaisseur ». De l'expérience générale de l'Administration Locale de Sumapaz on va placér un épaisseur de 150 mm. Il est important de préciser que la pratique ne prévoit pas la réalisation d'une phase d'études et de dessins et modèles, ce qui permet de caractériser avec précision la capacité ou la résistance de l'infrastructure et la détermination du type de sol de fondation. Signifie que le trafic de la région c'est extrêmement faible, et le trafic poids lourd se caractérise principalement par le transport en commun qui fait seulement un aller-retour dans la journée. Autres types de mouvements de fret sont générées par travail, transport de produits agricoles, des animaux et des aliments.

Fraisage émulsion stabilisée asphalte in situ, est placée comme couche « Pleine profondeur », c'est-à-dire fraisage couche s'étend directement au-dessus du sol naturel ou dans le meilleur des cas sur une affirmation qui existent déjà. Il est important de souligner que la matière de fraisage utilisé par le biais de cette procédure n'est pas soumise à tout processus de déchetage supplémentaire pour se conformer à une broche de taille de particule spécifique. Cependant une zone de sélection est effectuée à l'aide de la niveleuse pour enlever la tailles de chaussée dépassant les $\frac{3}{4}$ ".

Figura 3 Répartition des dimension du grain utilisé.



Le processus de construction est réalisé d'une manière générale à travers les activités suivantes : a) une évaluation visuelle et mécanique du sol naturel ou sur le declive (avec le passage des camions à benne basculante) ; b) le declive existant est scarifiée et compacté ; c) s'il y a encore des points avec faible importance, on va remplir avec « rajon » (Figure 2) ; d) on travaille le matériel de fraisage avec une dimension du grain maximale de $\frac{3}{4}$ " ; e) on va arroser le terrain par une irrigation avec émulsion ; f) étendre une première couche d'une épaisseur de 80 mm et 70 mm, l'irrigation de rupture lente avec une émulsion 70 lt/m³ (valeur obtenue selon un modèle générique de mélange) et la période de maturation de 8 jours. g) compactage vibratoire équipé d'au moins 7 tonnes de capacité, le nombre de passes selon l'étalonnage d'un test exécuté.



Figura 4. Stabilisation avec revêtement sol saturé en bordure des zones de transit.

2.3.2. Equipements

Un des avantages observés dans l'application de la meunerie stabilisée est l'utilisation de petites machines, on a essentiellement besoin de une niveleuse, une machine pour epandre d'émulsion et un vibro-compacteur (voir la Figure 5 (a), 5 (b), 5 (c)).

Ce qui précède apporte une valeur ajoutée à la diminution de la consommation d'énergie et émissions type de réduction à effet de serre..



Figura 5. Machines utilisées dans la mise en place de la fraise s'est stabilisée. (a) niveleuse, (b) citerne d'émulsion, (c) Vibro-compacteur

2.3.3. Performance

En conformité avec les pratiques effectuées et les sections plus anciennes qui ont été suivies par l'Administration Locale de Sumapaz, la vie utile moyenne, quand il y a des travaux correctement faits, se prolonge jusqu'à 5 ans, quand les chaussées seront reconstruites. Cette période pourrait être prolongée si on peut effectuer un entretien préventif en temps opportun, appuyé sur un "Programme de gestion des routes rurales". Comme traitement préventif dans ce période on ira sceller les fissures et comme traitement de routine est recommandé mettre en œuvre d'une irrigation de coulis d'émulsion ou d'asphalte.

2.3.4. Dommages observés

Comme les mécanismes de détérioration, ont été identifiés principalement dénuder et fissuration ou rupture due à un manque de capacité portante sur la couche de soutien. La détermination exacte de la flache à réparer est une opération peu facile et délicate sur une route bien entretenue; si le cantonnier, en effet, délimite la flache au hasard, il laisse sans réparation une portion de cette flache qui se remplit d'eau et devient, par suite, une cause de dégradations. il met aussi des matériaux sur des parties où ils sont inutiles, la pièce se

trouve à côté du trou, comme l'on dit vulgairement, et il en résulte des dépressions et des épaulements plus nombreux qu'auparavant; la route devient de plus en plus mauvaise; sa surface, de moins en moins unie, donne plus de tirage à toute espèce de locomotion et tout le monde souffre d'un pareil état de choses.



Figura 6. Dommages observés dans les routes construites en matériau de fraisage.
(a)Échec de la saturation en bordure de route par manque de caniveau. (b) détail de la fissuration longitudinale par saturation.

Lorsque les défaillances sont présentés sur la couche, c'est-à-dire régulière, on peut définir une figure géométrique et couper la chaussée pour l'entretien uniquement dans cette section. Ensuite la partie endommagée et stable de la plate-forme avec une pierre lapidée ou pierre "rajon" (qu'on appelle couramment ce traitement dans le centre de la Colombie). La figure 7 montre une image de l'aspect final de l'utilisation de cette méthodologie.



Figura 7. État final de la chaussée en matière de fraisage

2.3.5. Coûts

La solution de rechange décrite par le présent document s'avère pour être très économique pour les collectivités locales, dû au fait que les agrégats qui sont l'une des principales matières au moment de préparer un mélange d'asphalte sont considérés comme sans frais, n'avoir à tenir compte de leur transport vers le lieu de travail. Le détail des coûts est illustré dans le Figure 8.

Item	Unidad	Costo Directo €	Costo Directo USD\$	COSTO TOTAL	
				€	USD\$
TRANSPORTE DE MATERIAL FRESADO (Con distancia de 81 Km)	m ³ -Km	0.377	0.480	118,614.72	151,047.41
TRANSPORTE DE EMULSION ASFALTICA Y RIEGO EN SITIO (Con distancia de 81 Km)	Lt-Km	0.005	0.006		
SUMINISTRO DE LA EMULSION ASFALTICA (Con Distancia de 81 Km)	Lt	0.550	0.700		
MEZCLADO, EXTENDIDA Y COMPACTACION DE MATERIAL FRESADO	m ³	18.929	24.105		
El material fresado-RAP es suministrado a "cero" costo					
Tasa representativa del Mercado a 9 Nov-12	Euro	COP\$2310			
	Dólar	COP\$1810			

Figure 8. Coûts de 1 km de route avec un largeur de chaussée de 6 m dans la localité de Sumapaz (à 81 Km de la zone urbaine de Bogotá)

2.3.6. Impact sur l'environnement

Comme on peut observé dans les travaux d'entretien des routes rurales dans le parc naturel de Bogota on va utiliser le matériaux fraisat pour la création de nouveaux chaussée en enrobé bitumineux.

Du point de vue de l'utilisation d'équipement, l'alternative c'est intéressante par le faible volume des machines employées (motor grader, vibro-compacteur, irrigateur d'émulsion et de camions à benne basculante).

Les principaux avantages environnementaux sont décrits ci-dessous :

- a. on empêche l'utilisation de ressources non renouvelables
- b. on va appliquer le matériau à froid, avec un impact réduit sur le réchauffement planétaire.
- c. minimum de machines et/ou des matériaux
- d. répond à l'objectif d'améliorer l'accessibilité.
- e. on va réutiliser les matériaux résultant de l'entretien des autre routes.

3. L'analyse des coûts pour les trois études de cas

L'analyse des coûts entre les trois cas d'étude qui nous avons décrits

- une chaussée avec un système géogrilles extrudées de renfort,
- une chaussée en béton de ciment
- une chaussée en enrobé bitumineux

montre que la combinaison des géogrilles extrudées de renfort à joint intégrale avec remplissage crée un matériel composé (sol + géogrille) bien plus performant que le seul terrain. L'amélioration des caractéristiques mécaniques de cet ensemble permet de faire des économies grâce aussi à la possibilité d'utiliser des matériaux de remplissage présents sur place. L'utilisation de géogrilles de renfort à joint intégrale permet de réaliser des œuvres à coûts inférieurs (Figure 9).

Coût de 1 km de route avec un largeur de chaussée de 6 m	Euro pour km	Entretien dans le temps - coût en Euro					Coûts en Euro après une durée de vie
		après 10 ans	après 20 ans	après 30 ans	après 40 ans	après 50 ans	
chaussée avec un système géogrilles extrudées de renfort	222.000						222.000
chaussée en béton de ciment	174.000					174.000	348.000
chaussée en enrobé bitumineux fraisat*	118.614	118.614	118.614	118.614	118.613	118.614	711.683

* le matériel de fraisage c' est à coût nul

Figure 9 L'analyse des coûts entre les trois études de cas

4. Perspectives mondiales de la connectivité et solutions d'entretien des routes rurales

Pour rendre un cadre mondial des perspectives sur le choix des types de chaussées on a décidé de intégrer l'analyse des coûts avec l'analyse de cycle de vie et les coûts globaux. Le commentaires comparatif entre une chaussée avec un système géogrilles extrudées de renfort, une chaussée en béton de ciment et une chaussée en enrobé bitumineux sont subséquemment relatif aux paramètres :

- l'analyse des coûts
- l'analyse de cycle de vie calcule les impacts environnementaux potentiels et permet d'évaluer les conséquences sur l'ensemble de cycle de vie des routes (concept du berceau au tombeau). C'est une approche qui tient compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation ou la réutilisation du produit, du recyclage et de la gestion des déchets en fin de vie.
- l'analyse des coûts globaux pour tous les paramètres monétarisables

La durabilité c'est la qualité de ce qui dure longtemps. Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, c'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint, ce qu'on appelle couramment la solidité d'un objet ou d'un équipement, par opposition à l'obsolescence.

Il est donc nécessaire d'établir des indicateurs environnementaux et économiques qui permettront d'orienter les choix des décideurs publics car des interventions multiples d'entretien pesant sur le budget de fonctionnement et sur le budget d'investissement.

C'est la structure même des rues et des chemins ruraux qui est atteinte: les causes en sont l'âge, bien sûr, mais aussi l'hétérogénéité des matériaux utilisés – briques, graviers, gravats et pierres –, posés souvent sur un fond argileux ou limoneux qui a tendance à remonter avec le temps et à réduire la capacité de drainage, et surtout l'effet dévastateur du trafic de poids lourds ou d'engins agricoles en période de dégel, après un hiver rigoureux. Moyennement pour les chaussées bitumineuses, chaque année, le 5 % du réseau rurale nécessite d'entretien.

C'est très important signaler que pour les chaussées en béton de ciment les temps d'entretien sont très différents: on doit faire un regarnissage des joints après dix ans, des réparations mineures avec regarnissage de tous les joints après vingt ans, des réparations majeures avec meulage et grenailage après trente ans et une correction à l'enrobé et resurfaçage après cinquante ans.

4.1. Comparaison sur le cycle de vie complet

Les impacts liés à la circulation des véhicules sont très importants par rapport aux impacts liés à la construction, l'entretien et fin de vie de la chaussée. De ce fait, toute économie durant la phase d'utilisation prend toute sa signification. La prise en compte de l'influence du revêtement routier sur la consommation des véhicules se trouve donc pleinement justifiée dans cette analyse. Si une consommation égale est considérée pour les véhicules quel que soit le revêtement, les solutions bitumineuses sont un peu plus favorables par rapport aux déchets solides inertes (la quantité de matériau utilisée est moindre et le recyclage est possible en fin de vie)

Les variantes béton sont mieux placées pour plusieurs d'indicateurs :

- acidification : les structures bitumineuses génèrent 20 % en plus de substances acides que les structures béton. La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent des émissions de gaz tels les oxydes d'azote (NO, NO₂) et le dioxyde de soufre (SO₂). Le dioxyde d'azote est fortement toxique (40 fois plus que le monoxyde de carbone CO et quatre fois plus que le monoxyde d'azote NO). Ces gaz ont donc des répercussions sur la santé publique, provoquant des irritations des yeux et des bronches, de la toux et des inflammations des bronches avec des altérations des fonctions respiratoires. En outre, en se transformant en sulfates et en nitrates – voire en acide sulfurique et nitrique dans les nuages – et en retombant ensuite avec l'eau de pluie, ces gaz causent des dégâts importants à la flore (attaque physico-chimique des aiguilles et des feuilles et destruction des radicelles des végétaux, lessivage des éléments nutritifs des sols). Ce processus est accéléré en présence d'ozone. D'où la nécessité de réduire les émissions des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation. Les économies (réduction de 10 % sur 30 ans) pour routes en béton provenant de la réduction de consommation des véhicules.
- composés organiques volatils (COV). Ce sont des molécules organiques (hydrocarbures, aldéhydes, cétones, acides et dérivés), constituées principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, mais aussi d'atomes d'oxygène, de chlore, de soufre, de phosphore ou de fluor: les chaussées bitumineuses sont environ 10 fois plus polluantes que les structures béton.
- coûts : chaque année, 5 % en moyenne du réseau secondaire doivent faire l'objet de travaux d'entretien.
- déchets : les structures bitumineuses sont légèrement moins génératrices de déchets, les structures avec géotextiles sont les plus génératrices, les structures béton génèrent plus de déchets que les structures bitumineuses mais il faut toutefois rappeler que les déchets générés par les structures béton sont des déchets inertes sans conséquences nuisibles sur la santé et sur l'environnement.

- déchets radioactifs: pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont cinq fois plus polluantes des chaussées béton.
- eau : les structures bitumineuses sont environ trois fois plus consommatrices d'eau que les structures béton.
- épuisement des ressources : pour entretenir et étendre le réseau routier, milliards de tonnes de bitume sont consommées dans tout le monde par an, alors que ce produit, à l'instar du pétrole, dispose de réserves limitées et non renouvelées. Quant aux granulats et ciments, leurs productions se font à partir de ressources naturelles abondantes. La plupart de ces ressources naturelles sont en voie d'épuisement et il est de notre devoir aujourd'hui de les préserver en réduisant leur consommation aussi bien dans les travaux de construction et d'entretien, que dans la phase d'utilisation de la route.
- eutrophisation et écotoxicité: il y a la nécessité de réduire les émissions des oxydes d'azote dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation. La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent des émissions de polluants tels le plomb (additif ajouté au raffinage du pétrole), le zinc (altération de la galvanisation des glissières de sécurité en acier) qui, entraînés par ruissellement vers les eaux de surface (rivières et lacs), et associés au problème d'eutrophisation évoqué précédemment, provoquent la toxicité aquatique et engendrent la disparition progressive des espèces animales. D'où la nécessité de réduire les émissions des polluants dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation. La toxicité de certains produits peut se ressentir à moyen ou long terme, sans avoir forcément d'effets immédiatement visibles. La contamination indirecte (par consommation d'espèces contaminées) peut conduire à des phénomènes de bioaccumulation. Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes en matière d'écotoxicité. La réduction de l'écotoxicité, apportée par les chaussée en béton, sur une période de 30 ans, compense largement l'accroissement générée lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route.
- gaz à effet de serre: pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les moins polluantes en matière de gaz à effet de serre: 1,49.106 kg éq. CO2 contre 2,52.106 kg éq. CO2, en moyenne, pour les chaussées béton. Les structures béton génèrent 70 % en plus de gaz à effet de serre que les structures bitumineuses
- smog: pour le smog les chaussées bitumineuses sont environ deux fois plus polluantes que les structures béton

5. Conclusions

Les géosynthétiques sont universellement reconnus comme étant une technologie extrêmement efficace pour transformer des superficies à basse capacité portante en superficies pouvant supporter une surcharge. De plus l'impact sur l'environnement est réduit grâce à la possibilité de: limiter la profondeur des travaux de déblaiement jusqu'à 40% en moins; réduire le déplacement des matériaux (la réduction des déblaiements comporte la réduction du volume de terre pour la décharge); réduire l'utilisation de matériaux de remplissage plus "nobles" tels que granulats pour la stabilisation des sous-couches. L'augmentation des coûts de mise en décharge des matériaux non qualifiés de fouille, l'approvisionnement de tout-venants et l'actuelle sensibilité environnementale, sont à l'origine de l'utilisation de géogrilles « tridimensionnelles ».

Les chaussées en béton peuvent être une véritable alternative pour la réduction des déchets conférés aux sites d'enfouissement des matériaux dont cette élimination ou réduction implique des coûts sociaux et environnementaux élevés. Les matières premières utilisées dans la production de ciment peut être remplacés par matériaux « second», avec des résultats satisfaisants comme signalé dans de nombreuses publications internationales. Le ciment utilisé dans les mélanges de béton peut être remplacé en partie par le traitement des déchets Industriel : les trois produits les plus couramment utilisés comprennent les cendres de combustion du charbon dans les centrales thermiques, produit par laitier de haut fourneau des aciéries et la silice fumée usinage de la silice et les alliages fer-silicium.

Le coût de la première installation des pavés en béton ou avec geogrilles c'est supérieur à les chaussées enrobé, mais compte tenu du coût total tout au long de la vie utile, les structures rigides sont économiquement moins cher. Les investissements initiaux ont des coûts qui, comparées sur une période de 50 ans, déterminent en tout cas des économies non négligeables (Figure 9),

Aux États-Unis le 30 % du réseau principal c'est des chaussées rigides, en Belgique, vous arrivez à près du 40 % ; en Autriche le 25 % du réseau routier est en béton. En Italie il y a le 8% des voies rapides qui ont des chaussées rigides en béton recouvertes d'une fine couche d'asphalte, C'est un plancher qui confie la fonction de transporteur du blindage continu de dalle de béton (sans joints), sur lequel il est appliqué une couche de drainage usure en conglomerat bitumineux (environ 4 cm d'épaisseur de couche) qui s'appelle "Béton Bitumineux Semi-Grenu" (BBSG) et en Italie "Pavimentazione Composita Polifunzionale (PCP)", très utilisé pour les couches de roulement avec isolation phonique et des fonctionnalités pour réduire le phénomène "aquaplaning" et pour réduire les éclaboussures d'eau (spray) contre le pare-brise des véhicules.

Sur les routes à fort trafic de poids lourds, la résistance mécanique du béton permet de la construction de paquets de chaussée plus minces que les structures bitumineuses . La grande rigidité de la surface du béton, que ce soit une plaque ou une bande de longueur indéfinie, permet une meilleure répartition des charges appliquées à la surface, afin d'égaliser les tensions, les stress sont distribués sur une surface plus large et avec une moindre intensité.

Les chaussées en béton ont une luminance plus élevée que les chaussées bitumineuses. Le coefficient de réflexion des chaussées en béton est égal à 0,10, tandis que pour enrobés c'est de 0,07. Ceci offre des avantages pour les conducteurs qui reconnaissent les obstacles et mieux perçoivent correctement la taille de la chaussée.

Au niveau du dommage, les indicateurs de santé humaine, de réchauffement climatique et de qualité des écosystèmes sont tous favorables au système de chaussée en béton de ciment, aussi que les indicateurs de consommation des ressources, les indicateurs d'impact de l'acidification et les indicateurs relatif à l'eutrophisation aquatique.

REFERENCES

- R.Frischknecht, M.Tuchschnid, R. Itten, *Primärenergiefaktoren von Energiesystemen*, ESU -services Ltd., Uster (CH), April 2011
- SINANET, *Groupware Expert Panel Trasporti Stradali*, 2012
- K.Kicak, J.F. Ménard, *Analyse du cycle de vie comparative des chaussées en béton de ciment et en béton bitumineux à des fins d'integration de paramètres énergétiques et environnementaux au choix des types de chaussées*, CIRAIG, Montréal (Québec) Canada, 28 septembre 2009
- Cimbéton, *Le retraitement en place à froid des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers* – Routes, n. 96, juin 2006
- L.Ascione, *Innovative reinforcing bars for concrete structures*, Università degli Studi di Salerno, Salerno, 2006