



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral des routes OFROU

Documentation

Édition 2014 V1.00

Infiltration des eaux de chaussée des routes nationales par les bas-côtés

Méthodologie d'analyse du potentiel existant selon les exigences environnementales

ASTRA 88006

ASTRA OFROU USTRA UVIAS

Impressum

Auteurs / Groupe de travail

Pascal Boivin	(hepia Genève, chef de projet)
Alain Dubois	(hepia Genève, expert en SIG)
Karine Gondret	(hepia Genève, assistante)
Marguerite Trocmé	(OFROU N-SFS, présidence)
Yan Cerf	(OFROU DG-SI)
Jean-Marc Chassot	(OFROU I-EB)
Luzia Seiler	(OFROU N-SFS)

Traduction (version originale en français)

Éditeur

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers N
Standards, recherche, sécurité SFS
3003 Berne

Diffusion

Le document est téléchargeable gratuitement sur le site www.astra.admin.ch.

© ASTRA 2014

Reproduction à usage non commercial autorisée avec indication de la source.

Résumé

Ce rapport présente la méthode d'évaluation et de cartographie du potentiel d'infiltration des eaux de chaussée par les des bas-côtés des routes nationales. La méthode, sa fiabilité et ses hypothèses y sont décrites. Les critères d'aptitude à l'infiltration sont décrits et ressortent du cas de l'A9. Ils ont été cartographiés et typographiés séparément dans un premier temps (granulométrie* : teneur en argile*, topographie du système chaussée – bas-côtés : géométrie, présence d'une couverture de type prairie : état de surface). 600 km du réseau des routes nationales (RN) ont servi de prototype pour le développement de cette méthodologie. Les résultats de l'évaluation par critère ont été combinés dans une typologie des bas-côtés et une cartographie. Afin de chiffrer la fiabilité de l'évaluation, obtenue en partie à l'aide de sources indirectes, un contrôle de terrain a été réalisé Ce dernier a permis de calculer un indice de fiabilité de la méthode. Enfin, l'utilisation des données dégagées et la mise en œuvre de l'infiltration sond discutés. Les résultats SIG de la cartographie sont visibles dans le systèmes de base MISTRA.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht präsentiert die Evaluierungs- und Kartierungsmethode des Versickerungspotenzials der Strassenabwässer über die Bankette der Nationalstrassen. Er beschreibt die Methode, ihre Zuverlässigkeit und ihre Hypothesen. Der Bericht enthält eine Beschreibung der Kriterien der Eignung zur Versickerung, die sich auf den Fall der A9 abstützen. Sie wurden in einer ersten Phase getrennt kartiert und topografiert (Korngrößen-Verteilung*: Tongehalt*, Topografie des Strassensystems – Bankett: Geometrie, Vorhandensein einer Wiesenbedeckung: Oberflächenzustand). 600 km des Nationalstrassennetzes dienten als Prototyp für die Entwicklung dieser Methodologie. Die Resultate der auf Kriterien abgestützten Evaluierung wurden in einer Typologie der Bankette und einer Kartierung kombiniert. Zur Bezifferung der Verlässlichkeit der Topografie, die sich teilweise auf indirekte Quellen stützte, wurde eine Kontrolle im Gelände durchgeführt. Diese ermöglicht die Berechnung eines Verlässlichkeits-Indexes der Methode. Abschliessend wird die Verwendung der erarbeiteten Daten und die Umsetzung der Versickerung diskutiert. Die GIS-Resultate der Kartierung können in der Datenbank MISTRA abgerufen werden.

Summary

This report presents a methodology for mapping the potential for road runoff water infiltration and depuration on road embankments. The method is partly based on the former experience of A9 highway. It is applied and its reliability is quantified on a 600 km national road section. The potential is classified according to criteria that were first mapped separately (particle size distribution*: clay content*, topography of the road–embankment: geometry, presence of grass cover: surface condition). The results of the evaluation by criterion were combined in a typology and map of infiltration potential of road embankments. These results were compared to a field control, which allowed calculating method's reliability indexes (by criteria and as a whole). Lastly, the report discusses the use of the map information for the implementation of road runoff infiltration. The SIG mapping results can be viewed in the MISTRA basic system.

Table des matières

	Impressum	2
	Résumé	3
	Zusammenfassung	5
	Summary	7
1	Introduction	11
1.1	Objectif de la documentation.....	11
1.2	Champ d'application.....	11
1.3	Remerciements	11
1.4	Publication et modifications.....	11
2	Portée de l'étude	12
2.1	Evacuation des eaux par les bas-côtés	12
2.2	Objectifs de l'étude.....	13
2.3	Terminologie.....	13
2.4	Critères d'aptitude	14
2.5	Secteur d'étude	16
3	Méthodologie	19
3.1	Généralités	19
3.2	Données brutes utilisées.....	19
3.3	Traitement des données brutes utilisées	21
3.4	Méthode d'évaluation du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées, pour chaque critère d'aptitude, au niveau des bas-côtés	22
3.5	Méthode de validation de l'évaluation : test de fiabilité.....	25
4	Typologie des bas-côtés proposée	28
4.1	Etat de surface	28
4.2	Géométrie.....	28
4.3	Teneur en argile	28
4.4	Selon les trois critères d'aptitude	30
5	Cartographie du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés, pour les filiales 1 et 2	31
5.1	Etat de surface	31
5.2	Géométrie.....	33
5.3	Teneur en argile	35
5.4	Résultats par critère	36
5.5	Résultats par critère et par source	38
5.6	Résultats finaux.....	38
5.7	Résultats finaux tenant compte des s de protection des eaux	41
5.8	Représentation des résultats	43
6	Recommandations de mise en œuvre	44
6.1	Limites entre la typologie et les recommandations et la directive « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2]	44
6.2	Recommandations pour la mise en œuvre	44
7	Conclusions	46
	Annexes	47
	Glossaire	55
	Bibliographie	57
	Liste de modifications	59

1 Introduction

1.1 Objectif de la documentation

Cette publication documente une méthodologie développée pour analyser le potentiel d'infiltration par les bas-côté le long des routes nationales. La méthodologie n'examine que les critères environnementaux.

1.2 Champ d'application

Cette méthodologie peut s'appliquer à toute l'infrastructure routière.

1.3 Remerciements

Les auteurs de ce travail remercient chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué à son bon déroulement.

- À Marguerite Trocmé Maillard, Yan Cerf et Luzia Seiler (OFROU Berne).
- À L'ensemble des collaborateurs OFROU travaillant au sein des Filiales et des unités territoriales d'Estavayer-le-lac et de Thoune. Ces derniers nous ont été d'une grande aide lors de la phase de validation de la méthode sur le terrain en particulier Jean-Marc Chassot et Peter Liechti.
- À l'ensemble des personnes consultées lors de la recherche de données pédologiques visant à l'évaluation de la teneur en argile des sols le long des RN (route nationale) :
 - à l'ensemble des pédologues du service de protection des sols bernois et plus particulièrement à Peter Trachsel
 - à Philippe Dougoud (Pédologue retraité de l'école de Grangeneuve, canton de Fribourg)
 - à Michel Gratier et Claude Kündig (pédologue du CEVA, canton de vaud)
 - à Jean Fernex (Spécialiste sol de Office de l'environnement du Jura)
 - à Judith Besze-Deak (pédologue du service Cantonal d'Archéologie Neuchâtel)
 - à Yves Degoumois (pédologue ayant une bonne connaissance des sols Valaisans)

1.4 Publication et modifications

La présente Documentation a été publiée le 21.01.2014. La « Liste de modifications » se trouve à la page 59.

2 Portée de l'étude

2.1 Evacuation des eaux par les bas-côtés

L'infiltration des eaux de chaussées* dans les sols des bas-côtés est recommandée en première priorité depuis la directive OFEFP 2002 [4]. Toutefois, cette évacuation est soumise à des conditions, sur la nature des sols et la protection des eaux souterraines. Concernant ce premier point, les recommandations ont évolué depuis 2002, avec la mise à disposition de nouvelles connaissances.

Les directives VSA de 2002 [22] et 2008 [21] encadrent plus généralement l'infiltration des eaux de bien-fonds. Les deux cadres sont très proches, avec parfois de légères différences qui s'expliquent par la particularité de la situation des chaussées.

Le but général de cette infiltration est que les particules polluantes soient retenues dans la couche superficielle des sols des bas-côtés. La dimension du bas-côté et la nature des sols, sont donc importantes.

La directive (OFEFP, 2002, Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication [4]) a défini les propriétés des sols adaptés à l'infiltration des eaux de chaussées. Ces derniers devaient comporter deux horizons (A ou terre végétale*, et B) qui devaient notamment présenter des teneurs en argile* de 15 à 30%.

Le canton du Valais souhaitait rénover le réseau de collecte et de traitement des eaux de l'A9. Il a voulu appliquer des solutions d'infiltration, mais les sols de part et d'autre de l'A9 et donc des banquettes, ne dépassent pas 7% de teneur en argile. L'équipe du Pr. Boivin, mandatée par le SRCE-RN A9, a alors mis en évidence des points qui ont conduit à la révision, par la VSS et la VSA, des recommandations sur la texture des sols destinés à l'infiltration des eaux de ruissellement en général et de chaussées en particulier.

Les principales conclusions sont publiées dans l'article « Depuration of highway runoff water into grass covered embankments » de la revue Environmental Technology [27]. Les polluants routiers (organiques et ETM) sont composés à 90% environ de micro particules. La fonction du sol la plus efficace pour les retenir est donc la filtration, assurée par la présence de pores fins (5 à 50 micromètres). Les sols argileux (dès 25% d'argile) présentent à la fois des pores très fins (trop fins pour filtrer les micros particules) et des pores « structuraux » relativement grossiers qui créent l'infiltration préférentielle (bypass flow) et présentent donc le risque de ne pas retenir les particules. A l'inverse, les sols sablo-limoneux sont les plus aptes à la filtration. En outre, si les sols contiennent des carbonates, le pH élevé permet de stabiliser les métaux. Enfin, l'accumulation des polluants se fait en surface du sol, et ces derniers se contaminent très lentement ce qui autorise a priori des décennies d'infiltration en conservant des propriétés de sol fertile.

Ces constats ont conduit à réviser les recommandations sur la granulométrie des sols, en autorisant les textures sablo-limoneuses qui se révèlent particulièrement adaptées à l'épuration des eaux de ruissellement et de chaussées. Les sols les plus argileux, au contraire, se sont révélés délicats à manipuler (susceptibilité à la compaction, instabilité) et présentent un risque d'infiltration préférentielle élevé.

La directive ASTRA 18005 « Traitement des eaux de chaussées pour les routes nationales » [2] reprend ainsi l'ensemble des éléments permettant de gérer les eaux de chaussées, et présente les dernières recommandations simplifiées en termes d'infiltration par les bas-côtés.

Il est très important de noter que le sol, pour conserver ses capacités épuratives, doit être occupé par une végétation herbacée bien développée. Cette végétation et une texture peu argileuse (moins de 25%) garantissent à priori une bonne vitesse d'infiltration, si le sol n'a pas été compacté lors de sa mise en place (manipulation en conformité avec « Construire en préservant les sols », OFEV, 2001 [3]). De même, la présence d'une végétation de prairie garantit une teneur optimale en matière organique stable, qui joue un grand rôle dans l'épuration des polluants.

Finalement, la route et le bas-côté doivent présenter une pente, pour que s'y écoulent les eaux, et une surface d'infiltration suffisante, pour que les eaux s'y infiltrent entièrement. Dans ce but, le dispositif A9 a été complété par un fossé d'infiltration, ce qui permet de retenir les plus fortes crues, et constitue un bassin de rétention continu, offrant une grande garantie en cas d'accident majeur.

2.2 Objectifs de l'étude

La mise en œuvre de l'infiltration sur les bas-côtés est relativement simple et permet de réaliser des économies importantes tout en fournissant une épuration de très haute qualité. Cependant, elle tarde à se généraliser pour différentes raisons. En particulier les décideurs tardent à l'appliquer car ils n'ont pas toujours l'expérience de cette pratique ou les informations adaptées.

Afin de faciliter l'adoption de ces mesures sur le réseau des routes nationales, l'Office fédéral des routes (OFROU) a souhaité identifier les secteurs favorables du point de vue de l'environnement à une infiltration sur les bas-côtés des routes nationales. Cette cartographie du potentiel d'évacuation des eaux par les bas-côtés doit pouvoir ensuite servir à la mise en place d'un Masterplan du traitement des eaux de chaussées.

Ce rapport présente la méthode d'évaluation et de cartographie du potentiel d'infiltration des bas-côtés des routes nationales et l'application de cette méthode sur 600 km des routes nationales (RN). La méthode, sa fiabilité et ses hypothèses y sont décrites. Les critères d'aptitude à l'infiltration ressortant du cas de l'A9 ont été appliqués pour réaliser la présente étude. En complément à ce rapport une cartographie du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées* par les bas-côtés sur 600 km du réseau des routes nationales (RN) a été testée et livrée en format SIG*.

2.3 Terminologie

Dans le but de simplifier la compréhension des termes employés dans ce rapport, nous illustrerons nos propos à l'aide de schéma explicatifs. Ainsi, la figure 2.1 permet de comprendre à quoi correspondent les termes employés dans ce rapport pour désigner les éléments de base des RN*.

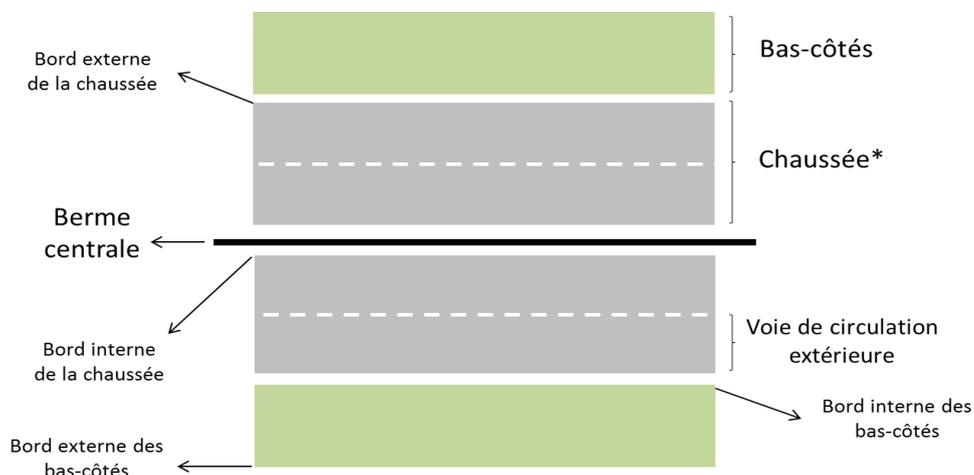


Fig. 2.1 Terminologie des RN* utilisée dans ce rapport.

2.4 Critères d'aptitude

Au niveau des bas-côtés, quatre critères déterminent l'aptitude à l'infiltration des eaux de chaussées. Trois critères sont présentés dans la fiche IV.1 de la directive ASTRA 18005 « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2], il s'agit de **l'état de surface** des sols des bas-côtés (la surface du sol doit être occupée par une végétation de type prairie), de la **géométrie** de la voie de circulation* extérieure et du bas-côté attenant (les eaux doivent s'écouler sur les bas-côtés depuis la chaussée, le bas-côté doit être de taille suffisante) ainsi que de la **teneur en argile*** des sols des bas-côtés (une teneur inférieure à 25% est demandée). Nous allons, dans ce chapitre, définir ces trois critères ainsi que les conditions favorables à l'infiltration des eaux de chaussées dans les sols des bas-côtés pour chaque critère. Le quatrième critère concerne les zones de protection des eaux. Rappelons que selon la loi sur la protection des eaux [1], l'infiltration est interdite en S1 (zone de captage) et S2 (zone de protection rapprochée) et est soumise à des critères restrictifs en S3 (zone de protection éloignée).

1. Etat de surface

L'état de surface décrit le type/la nature de la couverture du sol des bas-côtés.

L'état de surface est un critère important à prendre en compte dans cette étude puisqu'il conditionne la **capacité d'infiltration et de traitement** de l'eau par les sols des bas-côtés.

Une couverture des sols des bas-côtés de type herbacée, dense et permanente (prairie) est impérative du point de l'état de surface

En effet, conformément aux directives générales ([22], [2]), cet état de surface est le seul capable de garantir un sol biologiquement actif, ce qui permet d'assurer une bonne infiltration-épuration. L'activité biologique du sol, sous couvert herbacé permanent et non labouré, n'est pas dépendante de la teneur en matière organique (humus) des sols. Puisque cette dernière se stabilise naturellement, dans ces conditions, légèrement au-dessus de 10% de la teneur en argile* (g g^{-1}) [28]. Elle est, en revanche, dépendante de la teneur en argile (troisième critère de la typologie). Il est donc inutile, voire problématique, de fixer une teneur en matière organique indépendamment du sol pour garantir l'activité biologique du sol (risque d'amendements polluants). Cette dernière est pourtant spécifiée par la directive VSA (2002) [22] mais pas au sein de la directive « Traitement des eaux de chaussées des routes nationales » [2].

2. Géométrie

La géométrie décrit la forme dans l'espace (forme tridimensionnelle) de la voie de circulation* extérieure et du bas-côté attenant.

La géométrie est un critère important à prendre en compte dans le cadre de cette étude, puisqu'elle conditionne la **possibilité d'un écoulement de l'eau vers et dans les bas-côtés** du point de vue hydrodynamique.

Pour finir, la pente de la voie de circulation extérieure de la chaussée doit conduire les eaux de ruissellement vers le bas-côté attenant. En outre, le bas-côté attenant doit être en contrebas de la chaussée, sans obstacle entre la chaussée et ce dernier, pour que les eaux de ruissellement s'y écoulent. Le bas-côté doit être de dimension latérale suffisante (minimum 1 m d'extension) pour que l'infiltration y soit complète.

Les bas-côtés des RN construites en remblai développant au minimum 1 mètre d'extension latérale présentent les conditions favorables d'infiltration du point de vue de la géométrie [2] (cf.Fig.3.1)

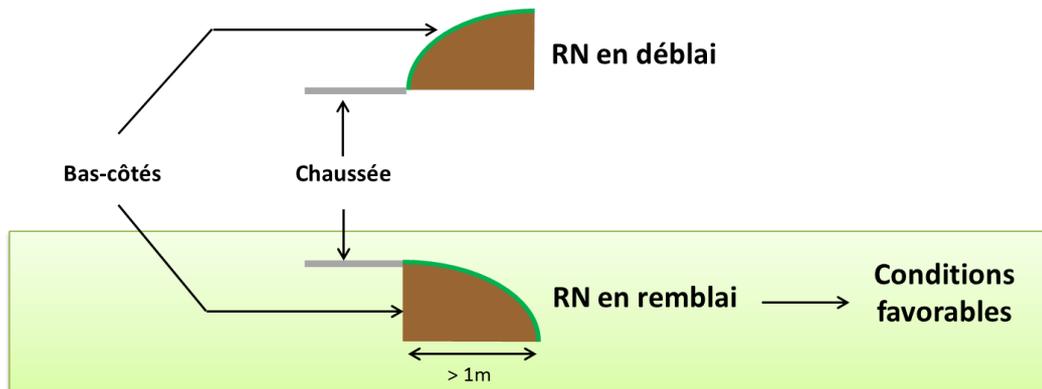


Fig. 2.2 Conditions favorables d'infiltration des eaux de chaussées en fonction du critère « géométrie » (RN : route nationale).

3. Teneur en argile*

La teneur en argile caractérise le pourcentage d'argile des sols des bas-côtés.

La teneur en argile est un critère important à prendre en compte dans le cadre de cette étude, puisqu'il conditionne la **capacité de traitement** de l'eau par les sols des bas-côtés.

La teneur en argile ne doit pas excéder un seuil, fixé à 25% par la directive « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2]. En effet, en dessous de 25% d'argile, l'infiltration préférentielle due à la formation de fentes de retrait (cf. figure 2.3) et de pores structuraux est négligeable. L'infiltration préférentielle de l'eau dans les sols correspond à l'écoulement de l'eau au sein de pores grossiers. Ce type d'infiltration minimise le temps de contact entre le sol et l'eau, ce qui a pour conséquence de court-circuiter la fonction filtre du sol. Puisque le but de l'infiltration des eaux de chaussées dans les sols des bas-côtés est d'épurer ces eaux, il est important d'éviter les conditions qui engendrent cette infiltration préférentielle. Par ailleurs, au-delà de 25% d'argile, la perméabilité du sol peut être très faible (s'il n'y a pas de porosité structurale ouverte) et par conséquent limiter l'infiltration de l'eau en son sein. Ce cas de figure n'est pas en accord avec les recommandations concernant l'infiltration (VSA 2002 [22] et VSA 2008 [21], directive ASTRA 18005 « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » 2013 [2]).

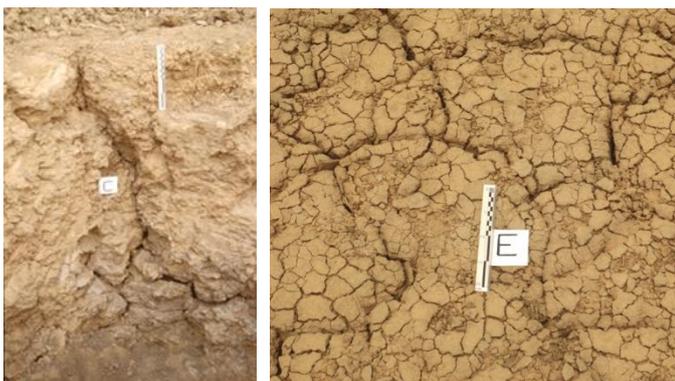


Fig. 2.3 Formation de fentes de retrait (ou de dessiccation) dans un sol argileux. (> à 25% d'argile). Les fentes de retrait se forment au sein de sols argileux lorsqu'ils se dessèchent.

Une teneur en argile inférieure à 25% au sein des sols des bas-côtés constitue la condition favorable à l'infiltration du point de vue la teneur en argile.

2.5 Secteur d'étude

La méthodologie développée pour évaluer le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés a été appliquée et testée dans des situations géographiques et topographiques différentes rencontrées sur 600 km de réseau RN (composé d'autoroute* et de semi-autoroute*) appartenant aux filiales **d'Estavayer-le-lac** (filiale 1) et de **Thoune** (filiale 2) situé en dehors :

- **des zones ouvrages d'art** (ponts, tunnels)
- **des zones de travaux** (Le potentiel d'infiltration des RN en travaux le 11/11/2011 n'a pas été étudié).

Notons que la méthode a été appliquée au niveau des rampes d'entrée et de sortie de RN car ces dernières étaient impossibles à exclure de manière automatisée.

Avant de déterminer le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées le long des RN, il nous fallait définir le nombre de kilomètre de bas-côtés en présence au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac (filiale 1) et de Thoune (filiale 2). Afin de **calculer le nombre de kilomètres de bas-côtés étudiés**, nous nous sommes **basés sur le champ « length »** (ce champ renferme les longueurs, en mètre, de chaque tronçon de RN) **de la couche SIG « TLM_STRASSE »** [21] que l'OFROU nous a livrée. Cette couche SIG comprend toutes les informations relatives aux routes nationales, aux ponts et aux tunnels dont nous avions besoin (localisation, longueur, date de mise en service ...) et provient du jeu de données « swissTLM3D version 1.1 ». Sur l'ensemble des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoune, certains tronçons de RN décrits au sein de cette couche SIG, pourtant situés en dehors des zones d'ouvrages d'art et de travaux, n'ont pas pu être pris en compte pour des raisons techniques.

Afin de définir le nombre de kilomètre de bas-côtés en présence au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac (filiale 1) et de Thoune (filiale 2), nous sommes partis des postulats suivants, au sein de la couche « TLM_STRASSE » :

- les autoroutes* sont représentées par deux axes (un axe « plus » et un axe « moins ») (cf. figure 3.6). Par conséquent, pour les autoroutes, la somme des longueurs associées aux axes correspond au nombre de kilomètres de bas-côtés situés de part et d'autre.
- les semi-autoroutes* ne sont représentées que par un seul axe (axe « égal »), au lieu de deux (cf. figure 3.8). Par conséquent, il est nécessaire de multiplier la longueur associée aux axes centraux par deux pour obtenir le nombre de kilomètres de bas-côtés situés de part et d'autre.

Ci-dessous, voilà le détail des calculs qui ont permis de déterminer le nombre de kilomètres de bas-côtés dans différentes cas de figure : A, B, C ou encore D.

- « **A** » = **nombre de kilomètres de bas-côtés théorique au total** = nombre de kilomètres d'autoroute + (2 × nombre de kilomètres de semi-autoroute) ; (correspond sur les figures 2.5 et 2.6 aux RN en blanc + RN en noir)

Etant donné qu'il n'y a pas de bas-côté au niveau des ouvrages d'art, nous avons ôté le nombre de kilomètres de RN en ouvrage d'art à « A » pour obtenir « B ».

- « **B** » = **nombre de kilomètres de bas-côtés hors des ouvrages d'art** = « A » – ((nombre de kilomètres d'autoroute en tunnel et en pont) + (2 × nombre de kilomètre de semi-autoroute en tunnel et en pont)) ;

Pour des raisons techniques, nous n'avons malheureusement pas pu prendre en compte la totalité du kilométrage de bas-côtés du cas de figure « B ». **Le nombre de kilomètres calculés pour le cas de figure « C » correspond au nombre de kilomètres de bas-côtés au niveau desquels nous avons réellement évalué le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées.**

- « **C** » = **nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié** (correspond sur les figures 2.5 et 2.6 aux RN en blanc) = « B » – « D » ; avec « D » = kilométrage de bas-côtés au niveau de RN en travaux le 10/11/2011 + kilométrage de bas-côtés le long de RN qui n'ont pas été prises en compte au sein de l'évaluation pour des raisons techniques)

Les figures 2.5 et 2.6 présentent le tracé RN finalement pris en compte lors de l'évaluation du potentiel d'infiltration des eaux de chaussée (**RN en blanc**) qui correspond à « C ». Estavayer-le-lac

Les cartes illustrant les tronçons de RN en travaux le 10/11/201, qui n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation, sont consultables en annexe I.1.

La figure 2.4 donne le kilométrage de bas-côtés le long des RN en fonction des différents cas de figures : A, B ou C, au niveau de chacune des filiales, ainsi que sur l'ensemble des deux filiales.

Fig. 2.4 Kilométrage des bas-côtés le long des RN par filiale et en fonction de la d'étude considérée : A, B ou C.

Filiale (s)	kilométrage de bas-côtés considéré		
	A (en Km)	B (en Km)	C (en Km)
Estavayer-le-Lac	987	700	603
Thoune	607	477	379
Estavayer-le-Lac et Thoune	1594	1177	982

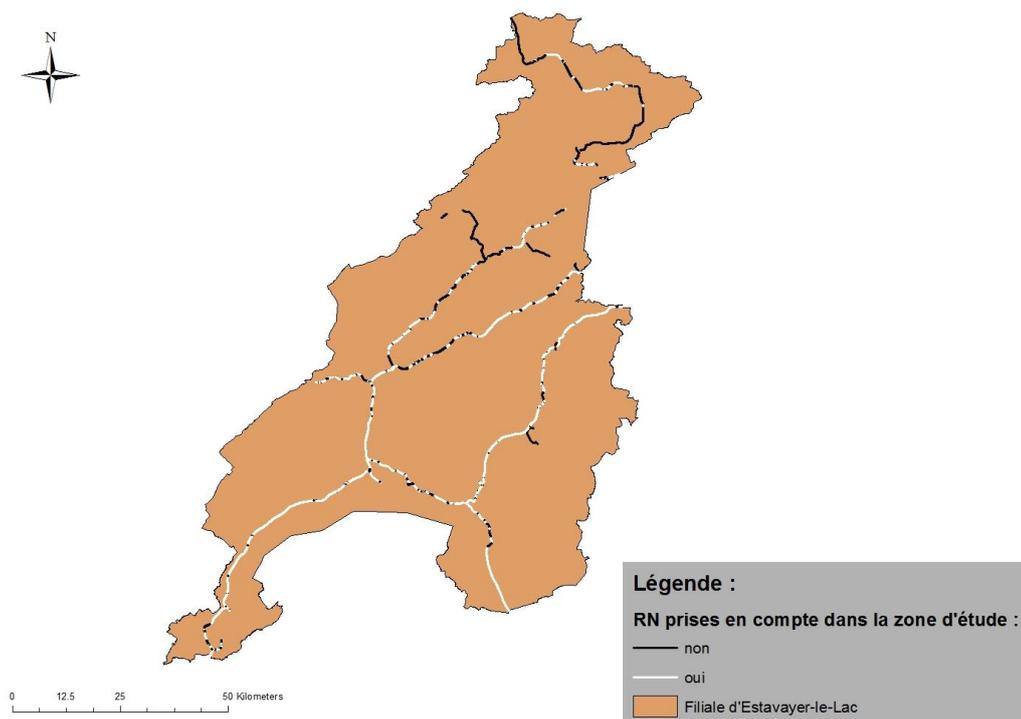


Fig. 2.5 Cartographie, au 650'000, des RN (routes nationales) de la filiale d'Estavayer-le-lac prises en compte dans l'évaluation du potentiel d'infiltration (Les RN en blanc sur la carte, correspondent à « C » = 603 Km) (les RN en blanc plus les RN en noir sur la carte, correspondent à « A » = 987 Km).

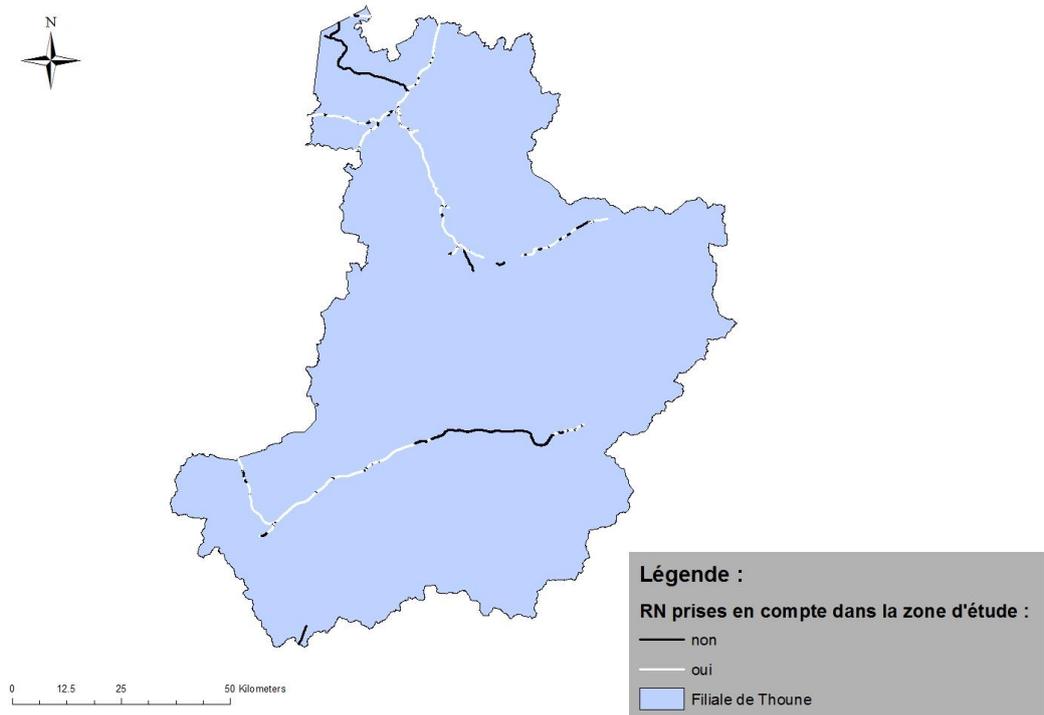


Fig. 2.6 Cartographie, au 650'000, des RN (routes nationales) de la filiale de Thionne prises en compte dans l'évaluation du potentiel d'infiltration (RN en blanc sur la carte, correspondent à « C » = 379 Km) (les RN en blanc plus les RN en noir sur la carte, correspondent à « A » = 607 Km).

3 Méthodologie

3.1 Généralités

La méthodologie développée avait pour objectif primaire la réalisation d'une cartographie rapide et économique, en recourant à des documents existants, notamment numériques (topographie (modèle numérique de terrain), photo aériennes, cartes pédologiques*) ainsi qu'à différentes expertises de pédologues (spécialiste des sols) en cas d'absence de données existantes concernant les sols. Une démarche fortement assistée par ordinateur a été imaginée, appliquée, puis testée sur 982 km de bas-côtés afin d'en dégager un indice de fiabilité.

L'estimation du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés est réalisée à l'aide de logiciel ArcGIS et de données acquises de façon indirecte, en fonction de chaque critère d'aptitude considéré (état de surface, géométrie et teneur en argile). Au niveau des bas-côtés, la nature de l'état de surface peut être identifiée à partir d'orthophotos infra-rouge. La géométrie peut, quant à elle, être caractérisée grâce au modèle numérique de terrain (MNT). Pour finir, la teneur en argile des sols peut être estimée sur la base de sources pédologiques disponibles sur le territoire Suisse, de nature et qualité variables.

Dès lors que l'on utilise des méthodes d'évaluation indirectes, la distinction entre les cas favorables et les cas défavorables comporte des cas limites dits incertains. Le potentiel d'infiltration en fonction de chaque critère a donc été typographié selon trois valeurs possibles: favorable, défavorable, et incertain. Le niveau de fiabilité de ces cartographies est chiffré grâce à un contrôle sur le terrain.

L'analyse finale du potentiel d'infiltration est obtenue par croisement des résultats par critère.

3.2 Données brutes utilisées

Les données brutes représentent l'ensemble des données utilisées pour estimer le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés.

1. Données de bases

Les données de bases correspondent aux données SIG* nous ayant permis de localiser les axes des RN, les ponts, les tunnels, les territoires des filiales d'estavayer-le-lac (filiale1) et de Thoune (filiale 2), nous ont été directement livrées par l'OFROU (cf. figure 3.2).

Fig. 3.1 Description des données SIG de bases utilisées*

Nom de la couche	Nature	Source	Date de mise à jour	Description	Précision (en m)
« TLM_STRASSE » issue du jeu de données « swissTLM ^{3D} version 1.1 »	Vectorel (polylignes)	Swisstopo	2012	Couche SIG localisant les axes RN, les ponts, les tunnels	1
AchsSeg_TLMGeometry_20120208	Vectorel (polylignes)	OFROU	08/02/2012	Couche SIG localisant les axes RN	1
ASTRA_Filialen	Vectorel (polygones)	OFROU	Livré le 07/03/2012	Couche SIG localisant le	5-10

2. Etat de surface

Aujourd'hui, l'approche la plus répandue dans toutes études visant à détecter la présence de végétation consiste à combiner l'utilisation des SIG* (Systèmes d'information Géographique) à celle de mosaïque d'ortho photos IR*(Infra-Rouge).

Voilà pourquoi nous avons fait le choix d'utiliser les d'ortho photos IR* de Swisstopo appelées « Swisssimage FCIR* » et disponibles sur l'ensemble du territoire des filiales 1 et 2.

Fig. 3.2 Description des données SIG* utilisées pour caractériser la nature de l'état de surface des sols des bas-côtés

Nom de la couche	Nature	Source	Date de dernière mise à jour	Précision (en m)
Swisssimage FCIR	raster	Swisstopo	12/2012	0.25 (3 à 5 m en terrain accidenté)

3. Géométrie

Aujourd'hui, l'approche la plus répandue dans toutes études topographiques consiste à combiner l'utilisation des outils SIG (Systèmes d'information Géographique) à celle des MNT (modèles numériques de terrain). Un MNT est une couche d'information géographique qui représente la topographie d'un terrain nu ou d'une planète. Autrement dit, un MNT décrit la surface du sol nu (sans construction, ni végétation), en trois dimensions. [29].

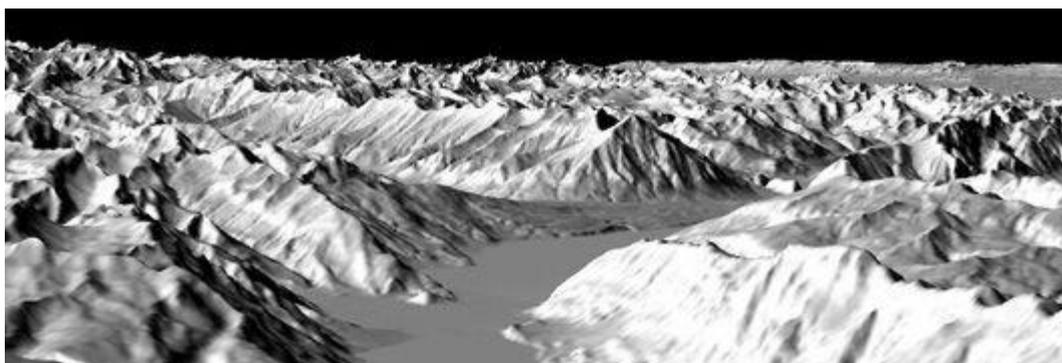


Fig. 3.3 Exemple de modèle numérique de terrain (MNT) [7].

Cette couche est créée à partir des données d'altitude du terrain. Un MNT* est caractérisé par sa *précision planimétrique** et *altimétrique**. La *précision planimétrique** d'un MNT dépend de la densité de sondage altitudinaux ayant servi à sa réalisation. Quant à la *précision altimétrique**, elle dépendra surtout de la technologie utilisée lors de l'acquisition de ces données d'altitude du terrain. Vous pouvez consulter les problèmes rencontrés lors du choix du MNT en annexe I.1.

Fig. 3.4 Description des données utilisées pour caractériser la nature de la géométrie

Nom de la couche	Nature	Source	Date de dernière mise à jour	Précision (en m)
swissALTI ^{3D}	raster	Swisstopo	2013	En dessous de 2000m : -Planimétrique ≈ 0.25 -altimétrique ≈ 0.50

4. Teneur en argile

Le long du tracé RN, notre estimation du potentiel d'infiltration en fonction de la teneur en argile est basée sur différentes sources de données pédologiques : des *cartes pédologiques** (format papier et SIG) et des expertises de *pédologues** (seulement au niveau des régions ne possédant pas de cartes pédologiques). Les données utilisées pour estimer la teneur en argile des sols des bas-côtés sont répertoriées dans la figure 3.5.

Fig. 3.5 Détail des données pédologiques utilisées pour établir l'évaluation de la teneur en argile granulométrique des sols des bas-côtés

Canton	Données pédologiques utilisées	Format	Auteur	Distributeur	Date de mise à jour	Echelle
Berne	Cartes des sols de la Neuville	vectorel	pédologues du canton de Berne	Service de protection des sols bernois	1985	1/5'000
	Carte des sols de Köppingen	vectorel	pédologues du canton de Berne	Service de protection des sols bernois	1996	1/5'000
	Expertise	Papier	Peter Trachsel et autres pédologues du service de protection des sols bernois		Septembre 2012	
Fribourg	Expertise	Papier	Phillippe Dougoud (Pédologue retraité de l'école de Grangeneuve)		Septembre 2012	
Genève	Carte pédologique des sols agricoles	vectorel	Michel Gratier et de Philippe de Pury (M.G. travaille actuellement au CEVA (VD))	SITG	1985	1/12'500
Jura	Expertises pédologiques issu du projet général (1,2,3,7 et8) effectué avant la construction de la N16 [15] [16]	Papier	Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura	Service de protection des sols du Jura	1987	1/5'000
	Expertises pédologiques issu du projet détaillé (4 et 6) effectué avant la construction de la N16 [17] [18]	Papier	Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura	Service de protection des sols du Jura	1988	1/1'000
Neuchâtel	Expertise	Papier	Judith Besze-Deak (pédologue du service Cantonal d'Archéologie Neuchâtel)		Septembre 2012	
Vaud	Carte des sols du canton de Vaud service cantonal de l'aménagement	vectorel	Michel Gratier et autres pédologues du canton de Vaud	CEVA (VD)	avril 2012	1/10'000
	« Carte écologique et physiographique des sols du canton de Vaud »[9]	papier	Rudolf Haeberli	CEVA	1971	1/100'000
Valais	Expertise	papier	Yves Degoumois		Septembre 2012	

3.3 Traitement des données brutes utilisées

Les étapes 1 à 3 sont indépendantes les unes des autres, elles ont été réalisées en parallèle. L'étape 4 n'a pu être réalisée qu'après avoir effectué l'étape 1.

Etape 1 : Sélection des tronçons d'autoroute* et de semi-autoroute*

Nous avons extrait les axes RN (axes des autoroutes et des semi-autoroutes) à partir de la couche SIG « TLM_STRASSE » issu du jeu de données « swissTLM^{3D} version 1.1 ». Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le « Catalogue des objets swissTLM3D 1.1 » qui décrit les attributs de ce jeu de données. L'extraction des axes RN représentant les autoroutes et les semi-autoroutes s'est donc faite grâce à l'attribut « Objektart » de la couche SIG « TLM_STRASSE », en sélectionnant les polygones présentant les valeurs « 2 » (autoroutes) ou « 21 » (semi-autoroutes) pour cet attribut.

Etape 2 : Etat de surface

Pour être en mesure d'identifier la nature de l'état de surface le long des bas-côtés, nous avons calculé l'indice de végétation (NDVI*) pour chaque pixel de la couche « Swissimage FCIR », à l'aide de la « fonction NDVI* » d' ArcGIS 10 [19].

Etape 3 : Géométrie

Pour identifier la nature de la géométrie, le modèle numérique de terrain « swissALTI^{3D} » a été utilisé tel quel.

Etape 4 : Teneur en argile

Pour estimer la teneur en argile des sols des bas-côtés, nous avons affecté, à l'aide d'ArcMap10[®], les informations relatives à la granulométrie* des sols traversés par les RN aux axes RN de la couche SIG « AchsSeg_TLMGeometry_20120208 ». Les informations relatives à la granulométrie des sols traversés par les RN sont issues des données pédologiques répertoriées dans la figure 3.5. Notons que pour estimer la teneur en argile des sols des bas-côtés, nous avons fait l'hypothèse que la granulométrie* des sols des bas-côtés était identique à celle des sols situés de part et d'autre des RN.

3.4 Méthode d'évaluation du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées, pour chaque critère d'aptitude, au niveau des bas-côtés

Les étapes 1 à 10 dépendent les unes des autres, elles ont été réalisées les unes à la suite des autres.

Avant d'estimer le potentiel d'infiltration par critère d'aptitude, au niveau des bas-côtés, nous avons mis au point une méthode permettant de localiser le bord interne des bas-côtés (cf. figure 2.1) puisqu'au moment de l'étude, l'OFROU n'était pas en mesure de nous transmettre cette information en format SIG.

1. Etape 1 : Création de profils transversaux

Des polygones, de 30 mètres de long, espacées de 50 mètres et disposées de façon perpendiculaire aux axes RN de la couche SIG « TLM_STRASSE » ont été générées.

La symbolisation des RN varie selon qu'il s'agisse d'une autoroute ou d'une semi-autoroute. En effet, au sein de la couche SIG « TLM_STRASSE », les autoroutes sont représentées par deux axes (Ces deux axes correspondent aux axes « + » et « - » de l'application TRASSEE (TRA)), tandis que les semi-autoroutes ne sont représentées que par un seul axe (Cet axe correspond aux axes « = » du système TRASSEE (TRA)). Par conséquent, les profils transversaux seront générés d'un seul côté des axes RN autoroutiers, tandis qu'ils seront générés des deux côtés des axes RN semi-autoroutes (cf. : figures 3.6, 3.7 et 3.8).

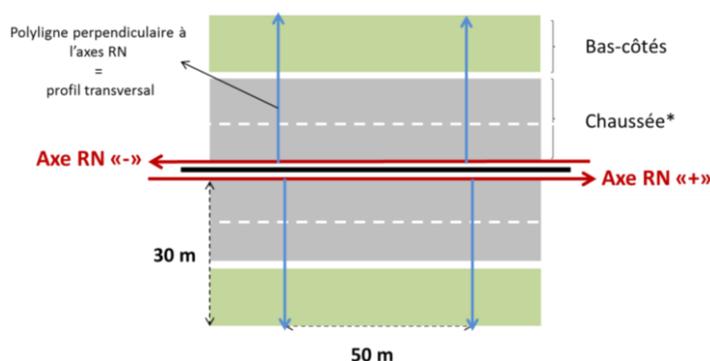


Fig. 3.6 Polygones générées lors de l'étape 1 pour les autoroutes.

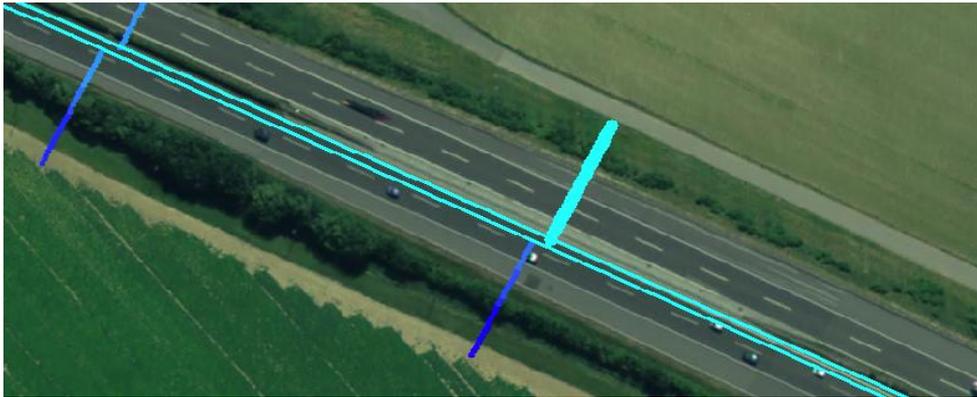


Fig. 3.7 Visualisation des polygones générées le long des axes autoroutiers lors de l'étape 1, sous « arcGIS ».

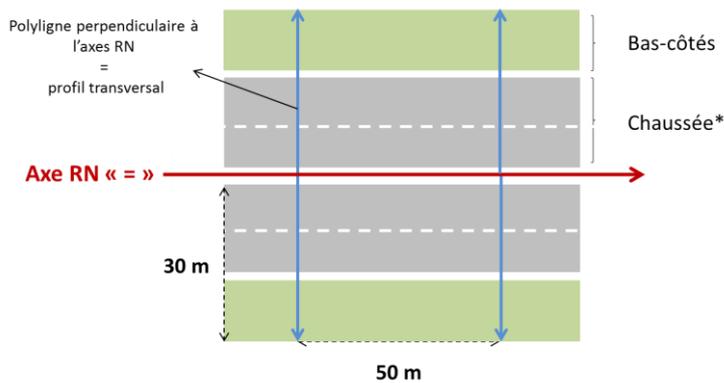


Fig. 3.8 Polygones générées lors de l'étape 1 pour les semi-autoroutes.

2. Etape 2 : Création de points le long des profils transversaux

Le long des polygones perpendiculaires aux axes RN (obtenues lors de l'étape 1), des points, espacés d'un mètre, ont été générés. Le premier point généré se situe sur l'axe.

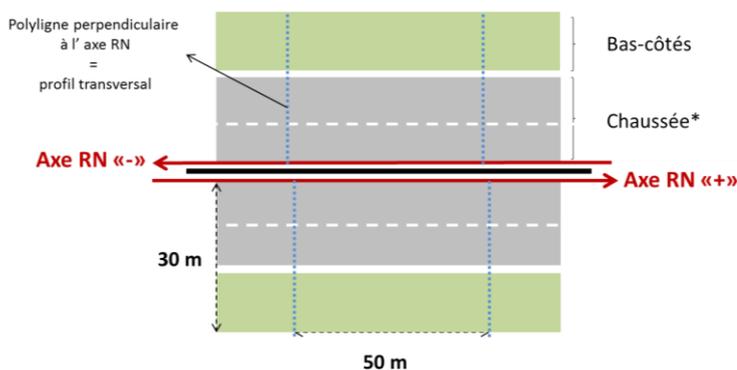


Fig. 3.9 Points générés lors de l'étape 2, le long des profils transversaux (exemple basé sur une RN de type autoroute).

3. Etape 3 : Géolocalisation du bord interne des bas-côtés et identification de l'état de surface de la chaussée et du bas-côté

Le bord interne des bas-côtés a été géo-localisé, grâce à l'extraction et l'analyse automatisée des valeurs de NDVI*, au niveau des points générés lors de l'étape 2. Dans cette méthode, le bord interne des bas-côtés correspond au changement d'état de surface : bitume/végétation. Pour chaque profil, une valeur seuil de NDVI* a donc été calculée de manière automatisée et considérée comme la limite entre bitume / végétation. Cette étape a été réalisée à l'aide d'un script ArcGIS en langage Python.

4. Etape 4 : Création de profils longitudinaux, de part et d'autre des profils transversaux, au niveau du bord interne des bas-côtés

Une fois le bord interne des bas-côtés géo-localisé, des profils longitudinaux ont été générés à ce niveau. Ces derniers font 50 m de long (25 m de part et d'autre des profils transversaux) et sont perpendiculaires aux profils transversaux.

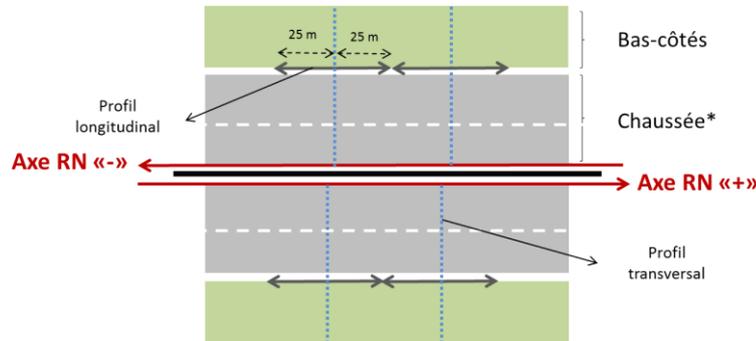


Fig. 3.10 Profils longitudinaux au niveau du bord interne des bas-côtés (exemple basé sur une RN de type autoroute).

5. Etape 5 : Suppression des profils transversaux et longitudinaux au niveau des bas-côtés présentant moins de deux mètres de végétation

Le script supprime l'ensemble des profils longitudinaux associés à des bas-côtés qui possèdent moins de deux mètres de végétation. Donc ce type de bas-côté ne présentera pas de résultats. Lors de la visualisation graphique des résultats, aucun résultats ne sera visible ce type de bas-côté. Ces bas-côtés porteront le nom de « bas-côtés non détectés » dans la suite du rapport.

6. Etape 6 : Création des profils topographiques

Nous avons créé des profils topographiques via l'extraction des valeurs d'altitudes, issues du MNT* « swissALTI3D 2013 » de Swisstopo, au niveau des points des profils transversaux.

Nous obtenons donc une multitude de profils topographiques, présentant au minimum deux mètres de végétation au niveau des bas-côtés. La fig.3.11 permet de montrer à quoi ressemble un profil topographique.

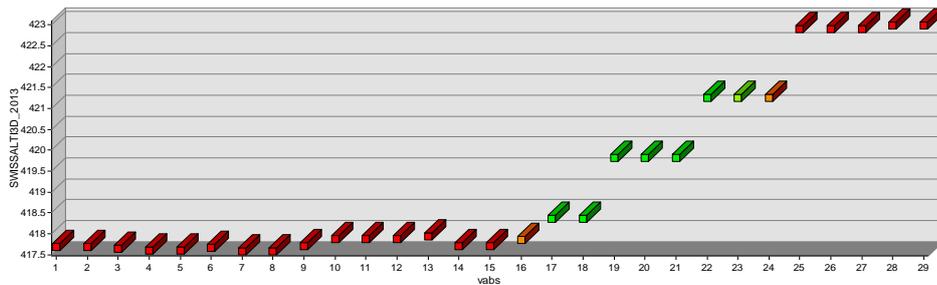


Fig. 3.11 Profil topographique de profil transversal (en ordonné : valeur d'altitude issues du swissAlti3d 2013, en abscisse : décalage par rapport à la berme centrale, de 1 à 29 m. En rouge : bitume, en vert : végétation, en orange : entre-deux).



Fig. 3.12 Capture d'écran représentant le profil transversal ayant servi à la création du profil topographique (ci-dessus) d'ArcMap.

7. Etape 7 : Classement des profils topographiques

Nous avons procédé au calcul automatisé de moyennes altitudinales mobiles le long des profils transversaux. Ensuite, en fonction de la succession des différences d'altitude relevées entre les moyennes mobiles calculées pour chaque profil, nous avons été capables d'affecter un type de géométrie à chaque profil topographique.

8. Etape 8 : Affectation des résultats d'état de surface, de géométrie et de teneur en argile aux profils longitudinaux

Les résultats de l'état de surface et de la géométrie ont été affectés aux profils longitudinaux grâce au script. Les résultats de teneur en argile ont, quant à eux, été affectés aux profils longitudinaux à l'aide de l'outil de proximité « NEAR » du logiciel ArcGIS [20].

9. Etape 9 : Agrégation des résultats et obtention du potentiel d'infiltration global (en fonction des 3 critères d'aptitude) des eaux de chaussées par les bas-côtés

Nous avons créé un nouvel attribut appelé « résultat_final » qui une fois renseigné rend compte du potentiel d'infiltration le long des bas-côtés en fonction des trois critères pris ensemble.

10. Etape 10 : Forme des résultats du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés

Nous avons consigné les résultats de l'évaluation du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés au sein de deux couches SIG, une par filiale.

Noms des couches: « potentiel_infiltration_estavayer_le_lac » et « potentiel_infiltration_thoune »

Type de géométrie : polylignes

Type de données : « File Geodatabase Feature Class »

Système de coordonnées : CH1903_LV03

11. Etape 11 : Risques d'erreurs et limites des méthodes développées

- **La détection des bas-côtés à l'aide de l'indice de végétation (NDVI*) n'a pas permis de détecter l'ensemble des bas-côtés appartenant au filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune.** Voilà pourquoi, lors de la représentation cartographique du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées au sein des bas-côtés, **certaines bas-côtés ne présentent pas de résultats, ces bas-côtés seront appelés dans la suite du rapport « bas-côtés non détectés ».** Le pourcentage que représentent ces bas-côtés non détectés, en fonction de A, B et C (cf. chapitre 2.5) sont consultables au sein de la figure 3.11 (ligne grise).
- La précision planimétrique* et altimétrique* du MNT utilisé peut entraîner des erreurs d'évaluation de la géométrie.
- L'hypothèse sur laquelle est basée l'estimation de la teneur en argile des bas-côtés peut induire des erreurs d'évaluation de ce critère. En outre, la diversité (nature et échelle) des sources pédologiques ayant servi à l'évaluation du potentiel en fonction de ce critère peuvent aussi constituer une source d'erreur.

Pour ces raisons un test de fiabilité a été réalisé.

3.5 Méthode de validation de l'évaluation : test de fiabilité

Le but de cette étape est d'évaluer la fiabilité de notre évaluation en confrontant les résultats de cette dernière à des observations de terrain.

Pour ce faire, nous avons relevé la nature des trois critères principaux sur le terrain (état de surface, géométrie et teneur en argile granulométrique*), au niveau de 140 points géo-référencés le long du réseau RN et distribués selon un plan d'échantillonnage ci-dessous.

1. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage qui a été utilisé est de type aléatoire stratifié.

Ici, nous souhaitons étudier, en priorité, l'impact de l'hétérogénéité des sources ayant servi à estimer la « teneur en argile » des sols des bas-côtés sur la fiabilité du potentiel d'infiltration en fonction de ce critère.

Nous avons donc eu recours à un plan d'échantillonnage de type aléatoire, stratifié en fonction :

- de la nature des sources pédologiques utilisées lors de l'évaluation du potentiel d'infiltration par les bas-côtés (au nombre de 3) (première stratification).
- des résultats d'infiltration pour le critère « teneur en argile granulométrique » (au nombre de 3) (deuxième stratification).

2. Choix de la taille d'échantillon

Pour choisir la taille de l'échantillon, nous nous sommes référés à la règle statistique suivante :

$$n = \left(\frac{z}{m}\right)^2 \times p \times (1 - p)$$

n = nombre d'échantillons

m = 0,10 marge d'erreur

z = 1,96 = valeur critique de la distribution normale standard

pour un risque d'erreur α = 0,05

$$p = \text{conjecture du } \frac{\text{nombre de succès}}{\text{nombre total d'échantillons}}$$

On part de l'hypothèse que le nombre de succès sur le nombre total d'échantillons sera compris entre 0,3 et 0,5. Autrement dit « p » sera compris entre 0,3 et 0,5. Le nombre de succès correspond au nombre de points d'échantillonnage présentant un état de surface, une géométrie et une texture conformes aux résultats de l'évaluation. On peut statistiquement approximer « p » par la valeur 0,5 afin de calculer le nombre total d'échantillons (= n).

Le calcul donne donc

$$n = \left(\frac{1,96}{0,1}\right)^2 \times 0,5 \times (1 - 0,5) = 96$$

Avec « p » compris entre 0,3 et 0,5, un niveau de confiance de 95% et une marge d'erreur inférieure ou égale à 10%, le nombre minimum de points d'échantillonnage à effectuer dans le cadre du test de fiabilité s'élève à 96.

Nous avons souhaité travailler avec une meilleure marge d'erreur, c'est pourquoi nous avons décidé d'échantillonner 130 points au total. Ce qui nous permet d'obtenir une marge d'erreur inférieure ou égale à 8%.

Le nombre d'échantillons par strate est reporté dans la figure 3.13.

Fig. 3.13 Description du plan d'échantillonnage de type aléatoire stratifié mis en place lors de l'étape de validation des résultats issus de l'évaluation du potentiel d'infiltration par les bas-côtés (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié)

Type de source pédologique	Résultats d'infiltration obtenus pour le critère « teneur en argile granulométrique* ».	Longueur RN (en Km) (« C » = 872.36 km)	Nombre de points (total = 130 points)	
Echelle moins précise que le 1/25'000	Favorable	15.60	13	44
	Défavorable	48.98	13	
	Incertain	123.73	18	
Echelle plus précise que le 1/25'000	Favorable	77.10	16	38
	Défavorable	49.48	11	
	Incertain	40.58	11	
expertise	Favorable	428.38	28	48
	Défavorable	53.19	16	
	Incertain	35.37	4	

3. Données relevées

La localisation des points d'échantillonnage se fait grâce à leurs coordonnées GPS. Au niveau de chaque point d'échantillonnage, nous avons procédé :

- au contrôle visuel de la géométrie et de l'état de surface du bas-côté ;
- à l'échantillonnage du sol appartenant au bas-côté afin de contrôler la teneur en argile granulométrique de ce sol par test tactile (cf. annexe I) et par analyse en laboratoire en cas de doute (cf. annexe I).

Le test tactile nous a permis de distinguer les échantillons de sols qui présentaient moins de 20% d'argile de ceux qui en présentaient plus de 30%. Les sols présentant entre 20% et 30% d'argile ont quant à eux été analysés en laboratoire.

4. Forme des résultats du test de fiabilité

La distribution aléatoire des points d'échantillonnage, en fonction des différentes strates s'est faite grâce au logiciel ArcGIS 10. Il en a résulté une couche de points. Cette couche de points possède une table attributaire qui renfermera les données relevées pour chaque critère sur le terrain. De plus, cette table attributaire présentera les coordonnées GPS de chaque point.

5. Risques d'erreurs et limites de la méthode

- La localisation des coordonnées GPS de chaque point sur le terrain s'est faite à l'aide d'un GPS. Par conséquent, il peut y avoir une différence entre la localisation du point sur le terrain et sur la carte en raison de la précision du GPS.
- L'appréciation de la teneur en argile à l'aide du test tactile dépend en partie de la personne qui opère.

4 Typologie des bas-côtés proposée

4.1 Etat de surface

La typologie de l'état de surface présente deux catégories qui sont décrites dans le tableau suivant (cf. fig. 4.1).

Fig. 4.1 Typologie du potentiel d'infiltration en fonction de l'état de surface. Les bas-côtés qui n'ont pas vu leur potentiel d'infiltration évalué en fonction de l'état de surface sont :

- les bas-côtés en déblai
- les bas-côtés non détectés

Code	Description	Description simple	Potentiel d'infiltration selon l'état de surface
1	Bas-côtés végétalisés sur plus de 2m	Végétalisé	Favorable
2	Bas-côtés végétalisés sur moins de 2m	Non végétalisé	Défavorable
3	Bas-côtés non évalués	Non évalué	non évalué

4.2 Géométrie

La typologie de la géométrie présente trois catégories qui sont décrites dans le tableau suivant (cf. fig. 4.2).

Fig. 4.2 Typologie du potentiel d'infiltration en fonction de la géométrie (Les types géométriques suivants : « Petit déblai puis remblai incertain », « Plat incertain », « Remblai incertain » ont été classés dans la catégorie « potentiel d'infiltration incertain » car les variations d'altitude de ces 3 types géométriques sont inférieures au seuil de détection de la méthode employée. (Ce seuil est égal à 0.2m)

Code	Description	Description simple	Potentiel d'infiltration selon la géométrie
CH1_BC1	Remblai sur 1m au minimum	Remblai sur 1 mètre au minimum	Favorable
BC4	Déblai	Déblai	Défavorable
CH1_BC3	Petit déblai puis remblai incertain	Incertain	Incertain
CH2_BC??	Plat incertain		
CH2_BC1	Remblai incertain		

4.3 Teneur en argile

Rappelons que pour caractériser le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées au sein des bas-côtés en fonction de la teneur en argile, nous nous sommes principalement basés sur des documents de type cartographies des sols. Ce type de cartographies ne donnent généralement pas directement la teneur en argile des sols cartographiés, mais plutôt la classe texturale* à laquelle ils appartiennent, qui a été évaluée sur le terrain à l'aide du test tactile (cf. glossaire). La classe texturale d'un sol donne, entre autres, la fourchette de teneur en argile que ce dernier peut présenter. Les différentes classes texturales décrivent des sols qui présentent :

- des teneurs en argiles strictement inférieures à 25%
- des teneurs en argiles strictement supérieures à 25%
- des teneurs en argiles comprises entre 20 et 30%

En premier lieu, nous avons donc typographié le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées en fonction de la teneur en argile de la façon suivante :

- Sur une carte pédologique, un sol caractérisé par une classe texturale qui définit des sols présentant des teneurs en argiles strictement inférieures à 25% **présente un potentiel d'infiltration favorable.**
- Sur une carte pédologique, un sol caractérisé par une classe texturale qui définit des sols présentant des teneurs en argiles strictement supérieures à 25% **présente un potentiel d'infiltration défavorable.**
- Sur une carte pédologique, un sol caractérisé par une classe texturale qui définit des sols présentant des teneurs en argiles comprise entre 10 et 30% **présente un potentiel d'infiltration incertain.**

Or, en analysant en laboratoire la teneur en argile des échantillons relevés sur le terrain, nous nous sommes aperçus que 85% des sols sensés présenter entre 10 et 30% d'argile, selon notre évaluation (faite à l'aide de cartes pédologiques*), en présentaient en réalité moins de 25% d'argile. Ce résultat semble tout à fait logique car à l'aide du test tactile, il est courant de surestimer la teneur en argile d'un sol. La catégorie « potentiel d'infiltration incertain selon la teneur en argile » correspond donc en réalité à la catégorie « potentiel d'infiltration favorable selon la teneur en argile ». Nous avons donc regroupé ces deux catégories sous la catégorie « potentiel d'infiltration favorable selon la teneur en argile ». La typologie de la teneur en argile comprend en définitive deux catégories qui sont décrites dans la figure 4.4.

- Un sol caractérisé par une classe texturale qui définit des sols présentant des teneurs en argiles strictement inférieures à 25% ou comprises entre 10 et 30% **présente un potentiel d'infiltration favorable.**
- Un sol caractérisé par une classe texturale qui décrit des sols présentant des teneurs en argiles strictement supérieures à 25% **présente un potentiel d'infiltration défavorable.**

Fig. 4.3 Typologie du potentiel d'infiltration en fonction de la teneur en argile. Le triangle textural de la FAO datant de 1968 a été utilisé par Haeberli pour caractériser les classes texturales des sols cartographiés en 1971, au 1/100'000, au sein de la : « Carte écologique physiographique des sols du canton de Vaud » (voir annexe I.4). Le triangle textural de la SSP (société Suisse de pédologie) datant de 1993 a, quant à lui, été utilisé pour caractériser les classes texturales des sols cartographiés au sein des autres données pédologiques utilisées dans ce travail pour évaluer la teneur en argile des sols traversés par les RN sur les filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoune

Classes texturale du triangle de la FAO	Classe texturale du triangle SSP	Code	Description	Potentiel d'infiltration selon la teneur en argile
Limon sableux (Silty loam : SL) Limon silteux (Silt loam : Lsilt), Limon (Loam : Lo)	Sable (S), Sable silteux (Su) Sable limoneux (SI) Sable fortement limoneux (Sfl) limon sableux (Ls) Limon (L) Silt limoneux(UI)	1	Moins de 25 d'argile	Favorable
Argile silteuse (Silty clay loam : scl) Limon argileux (Clay loam : cl)	Limon argileux (La) Argile limoneuse (AI) Argile (A)	2	Plus de 25% d'argile	Défavorable

4.4 Selon les trois critères d'aptitude

Au niveau d'un bas-côté, pour que le potentiel d'infiltration selon les trois critères soit « favorable », il faut que les potentiels d'infiltration en fonction de chacun des critères aient été évalués comme « favorable ». Pour que le potentiel d'infiltration selon les trois critères soit « défavorable », il suffit que le potentiel d'infiltration ait été évalué comme « défavorable » pour un seul des trois critères. Enfin, pour que le potentiel d'infiltration selon les trois critères soit « incertain », il suffit que le potentiel d'infiltration ait été évalué comme « incertain » pour un seul des trois critères et favorable pour les 2 autres (cf : figure 2.4).

Fig. 4.4 Trois exemples de typologie du potentiel d'infiltration en fonction des trois critères pris en compte au sein de l'évaluation : Etat de surface, Géométrie, Teneur en argile

Etat de surface	Géométrie	Teneur en argile	Potentiel d'infiltration selon les trois critères
Favorable (Végétalisé)	Favorable (Remblai sur 1m au minimum)	Favorable (Moins de 25% d'argile)	Favorable
Favorable (Végétalisé)	Favorable (Remblai sur 1m au minimum)	Défavorable (plus de 25% d'argile)	Défavorable
Favorable (Végétalisé)	Incertain (Plat incertain)	Favorable (Moins de 25% d'argile)	Incertain

5 Cartographie du potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés, pour les filiales 1 et 2

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse du potentiel d'infiltration par les bas-côtés qui ne prennent pas en compte les zones de protection des eaux souterraines. La typologie et la méthodologie sont testées sur une partie des bas-côtés appartenant aux filiales 1 et 2.

Rappel : le kilométrage de bas-côtés pris en compte dans l'évaluation a été présenté au sein de la figure 2.4.

5.1 Etat de surface

Le taux de fiabilité de la méthode concernant l'évaluation de l'état de surface est de 92%. Ce taux de fiabilité conforte le fait que l'utilisation des valeurs du NDVI* pour discriminer le végétalisé du non végétalisé est une méthode efficace. Elle a été améliorée par la recherche de la valeur de NDVI* seuil, entre le végétalisé et le non végétalisé, propre à chaque profil transversal. Notons que, d'après les observations visuelles faites sur le terrain, la grande majorité des bas-côtés du réseau des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoun sont enherbés. Cette caractéristique du réseau améliore encore l'efficacité de la méthode.

Le taux d'échec de la méthode est dû à la sensibilité de l'indicateur. Cette dernière a considéré que les bas-côtés présentant un caniveau bétonné de plus de 50 cm de large ou une végétation clairsemée étaient « non végétalisés » contrairement à l'observation sur le terrain. (cf. Figures 5.2 et 5.3).

Fig. 5.1 Taux de fiabilité de la méthode ayant servi à évaluer l'état de surface, « favorable » signifie « enherbé sur 2mètres » et « défavorable » signifie « non enherbé sur 2mètres ». (en bleu : catégorie prise en compte pour calculer le taux d'erreur, en violet : catégories prises en compte pour calculer le taux de fiabilité)

Résultats de l'évaluation	Résultats du terrain	Nombre de points concernés	Pourcentage de points concernés (en %)	Pourcentage de fiabilité (en %)
Favorable	Défavorable (caniveau de plus de 50cm de large)	3	3,29	92
Favorable	Défavorable (gravier)	4	4,39	
Favorable	Favorable	85	92	
Défavorable	Favorable	0		
		Total = 91	Total = 100	



Fig. 5.2 Photos prises au niveau des points 27, 28 et 94 (Vaud) au niveau desquelles les bas-côtés ont été classés comme bas-côtés « végétalisés » lors de l'évaluation mais considérés comme « non végétalisés » lors de l'observation de l'état de surface sur le terrain, du fait de la présence d'un caniveau bétonné, de plus de 50 cm de large et 30cm de profond.



Fig. 5.3 Photos prises au niveau des points 95, 98, 103 (Jura) et 140 (Neuchâtel) classés comme bas-côtés « végétalisés » lors de l'évaluation mais considérés comme « non végétalisés » lors de l'observation de l'état de surface sur le terrain du fait de la végétation clairsemée.

5.2 Géométrie

Le taux de fiabilité de la méthode concernant l'évaluation de la géométrie est de 72%. Les remblais et les déblais ont été relativement bien détectés par la méthode. En effet, 65% (= 49/75) des remblais et 70% (= 24 points sur 34 points de contrôle) des déblais observés sur le terrain ont été détectés par la méthode (cf. figure 5.6).

Les résultats du test de fiabilité ont prouvé que la géométrie des bas-côtés classés comme « plat incertain » était aléatoire. Les « remblais incertains » semblent, en revanche, être plats ou de types remblai (dans 73% des cas), mais cette information est peu fondée car elle se base sur seulement 30 points de contrôle. Rappelons toutefois que ces deux types de géométrie (plat et remblai incertain) présentent des variations d'altitude comprises entre 0 et 0.2 mètres (cf. figures 5.4, 5.5 et 5.6).

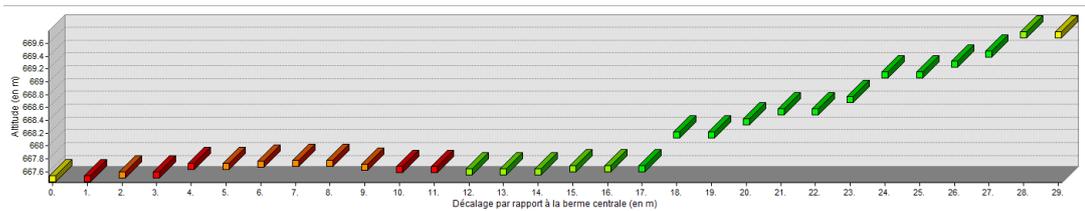
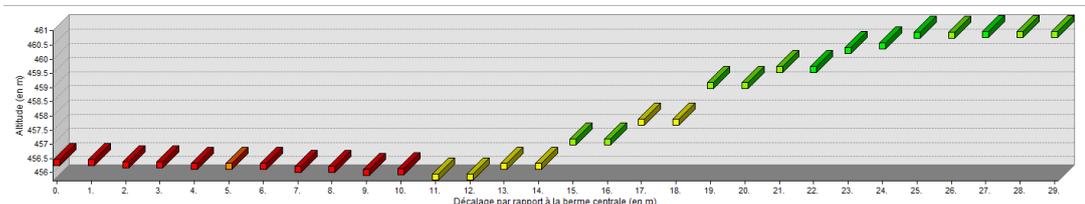


Fig. 5.4 Photo et profil topographique du bas-côtés faits au niveau du point de sondage 72 (Fribourg) classés en « remblai incertain » lors de l'évaluation mais considérés comme « plat » lors de l'observation de la géométrie sur le terrain (au niveau des profils topographiques, le rouge représente la chaussée tandis que le vert représente une surface végétalisée, en ordonnée : Altitude (en m), en abscisse : Décalage par rapport à la berme centrale (en m)).



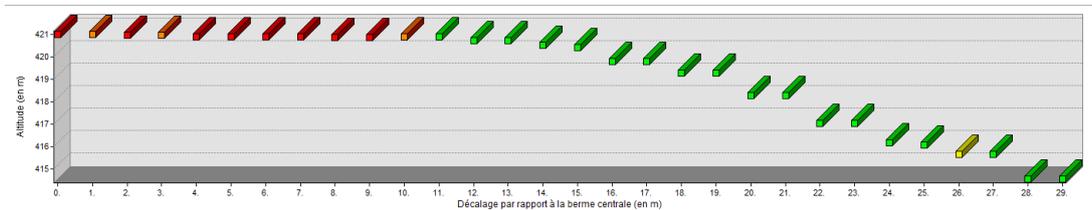
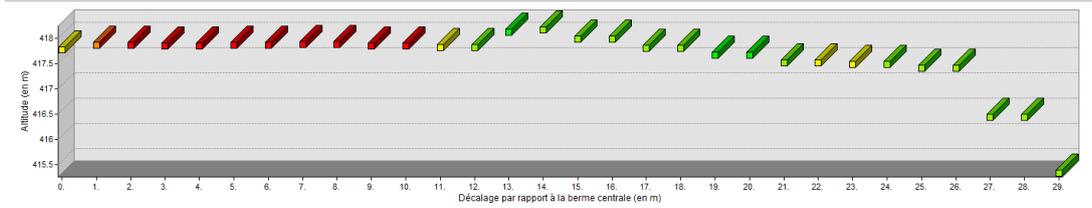


Fig. 5.5 Photos et profils topographiques des bas-côtés faits au niveau des points de sondage 17, 54 et 56 (Vaud) classés en « remblai incertain » lors de l'évaluation mais considérés comme « remblai » lors de l'observation de la géométrie sur le terrain, du fait de la présence de pente douce descendante sur plus d'un mètre. (au niveau des profils topographiques, le rouge représente la chaussée tandis que le vert représente une surface végétalisée, en ordonnée : Altitude (en m), en abscisse : Décalage par rapport à la berme centrale (en m)).

Fig. 5.6 Résultats détaillés du test de fiabilité de la méthode ayant servi à évaluer la géométrie (en bleu : catégorie prise en compte pour calculer le taux d'erreur, en violet : catégories prises en compte pour calculer le taux de fiabilité)

	Résultats de l'évaluation	Résultats de terrain	Nombre de points concernés	Taux Fiabilité géométrie (en %)
Les résultats de l'évaluation et du terrain ne coïncident pas	Déblai	Plat	8	72% (=93/130*100)
	Déblai	Remblai	7	
	Remblai	Plat	4	
	Plat incertain	Remblai	1	
	Remblai incertain	Déblai	8	
	Remblai incertain	Plat	6	
	Plat incertain	Déblai	2	
	Petit déblai puis remblai	Plat	1	
			Sous total =37	
Les résultats de l'évaluation et du terrain coïncident	Déblai	Déblai	24	
	Remblai	Remblai	49	
	Petit déblai puis remblai	Remblai	2	
	Plat incertain	Plat	2	
	Remblai incertain	Remblai	16	
			Sous total =93	
			Total = 130	

5.3 Teneur en argile

Le taux de fiabilité tenant compte des catégories « défavorable », « favorable » et « incertain » qui a été établi lors de l'évaluation est de 58% (cf. figure 5.7).

Fig. 5.7 Taux de fiabilité de la méthode ayant servi à évaluer la teneur en argile des sols, qui tient compte de la catégorie « potentiel d'infiltration incertain selon la teneur en argile », (en bleu : catégorie prise en compte pour calculer le taux d'erreur, en violet : catégories prises en compte pour calculer le taux de fiabilité)

Résultats de l'évaluation	Résultats du terrain	Nombre de points concernés	Pourcentage de points concernés (en %)	Pourcentage de fiabilité (en %)
Défavorable	Défavorable	25	18	58
Défavorable	Favorable	19	14	
Favorable	Défavorable	6	4	
Favorable	Favorable	56	40	
Incertain	Défavorable	5	4	
Incertain	Favorable	29	21	
		140	100	Total

Cependant, d'après les résultats du test de fiabilité les sols des bas-côtés classés dans la catégorie « potentiel d'infiltration incertain selon la teneur en argile » présente une teneur en argile inférieure à 25%. En effet sur 34 échantillons appartenant à la catégorie « incertain », 29 présentaient en réalité moins de 25% d'argile. Ce résultat paraît tout à fait probable sachant que, lors de l'évaluation de la texture des sols à l'aide du test tactile, la plupart des pédologues ont tendance à surestimer la teneur en argile. Il semble donc que **les sols classés dans la catégorie « potentiel d'infiltration incertain selon la teneur en argile » appartiennent en réalité à la catégorie « potentiel d'infiltration favorable selon la teneur en argile »**. Dans ces conditions, le taux de fiabilité passe de 58 à 78% (cf. figure 5.8).

Fig. 5.8 Taux de fiabilité de la méthode ayant servi à évaluer la teneur en argile des sols, qui considère que la catégorie « potentiel d'infiltration incertain selon la teneur en argile » correspond en réalité à la catégorie « potentiel d'infiltration favorable selon la teneur en argile », (en bleu : catégorie prise en compte pour calculer le taux d'erreur, en violet : catégories prises en compte pour calculer le taux de fiabilité)

Résultats de l'évaluation	Résultats du terrain	Nombre de points concernés	Pourcentage de points concernés (en %)	Pourcentage de fiabilité (en %)
Défavorable	Défavorable	25	18	78
Défavorable	Défavorable	19	14	
Défavorable	Favorable	6	4	
Favorable	Défavorable	56	40	
Incertain = Favorable	Favorable	5	4	
Incertain= Favorable	Défavorable	29	21	
		140	100	Total

5.4 Résultats par critère

Nous allons maintenant présenter le potentiel d'infiltration sur l'ensemble de « C » en fonction de chacun des 3 critères pris séparément (état de surface, géométrie et teneur en argile). La figure 5.9 livre ces résultats.

Fig. 5.9 Potentiel d'infiltration par critère exprimé en pourcentage de « C », pour la filiale d'Estavayer-le-lac d'une part, pour la filiale de Thoune d'autre part, ainsi que pour l'ensemble des deux filiales. (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié). Au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoune (928,33 Km), l'état de surface a été évalué sur 57,21% de « C », alors que la géométrie et la teneur en argile ont toutes deux été évaluées sur 88,67% de « C ». L'état de surface, la géométrie et la teneur en argile n'ont pas été évalués au niveau des bas-côtés n'ayant pas pu être identifiés à l'aide de la méthode (indirecte) de détection des bas-côtés utilisée. En outre, l'état de surface n'a pas non plus été étudié au niveau des bas-côtés identifiés comme « déblais » du point de vue de la géométrie.

Critère d'évaluation	Potentiel d'infiltration par les bas-côtés		Pourcentage en fonction de « C » (en %)		
			Filiale d'Estavayer-le-lac (« C » = 603,40 Km)	Filiale de Thoune (« C » = 378,92 Km)	Filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune (« C » = 982,33 Km)
Etat de surface	Favorable		57,67	56,48	57,21
	Non évalué	Bas-côtés non détectés	8,45	15,57	11,20
		Bas-côtés en remblai	33,81	27,97	31,56
Géométrie	Favorable		34,14	35,63	34,71
	Défavorable		33,81	27,97	31,56
	Incertain		23,37	20,85	22,40
	Non évalué (bas-côtés non détectés)		8,45	15,57	11,20
Teneur en argile	Favorable		66,95	83,39	73,30
	Défavorable		24,53	1,06	15,47
	Non évalué (bas-côtés non détectés)		8,45	15,57	11,20

Etat de surface

Au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thounne (« C » = 923,33 km), lors de l'évaluation de l'état de surface, seuls 57,21% de « C » (nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) ont été étudiés (ce qui équivaut à 562 km environ). Par conséquent, 42,26% (11,20% + 31,56%) de « C » n'ont pas été étudiés du point de vue de l'état de surface et ce pour deux raisons. La première est que l'état de surface n'a évidemment pas pu être évalué là où les bas-côtés n'ont pas été détectés par notre méthode, ce qui équivaut à 11,20% de « C ». La deuxième est que nous n'avons pas étudié l'état de surface au niveau des bas-côtés caractérisés comme « remblai » du point de vue de la géométrie, ce qui équivaut à 31,56% de « C ». Le fait de ne pas avoir évalué l'état de surface au niveau des « déblai » ne modifie pas les résultats finaux obtenus pour le potentiel d'infiltration en fonction des trois critères, sur l'ensemble des deux filiales. En effet, dans tous les cas ces 31,56% sont défavorables à l'infiltration puisqu'ils présentent une géométrie de type déblai qui n'autorise pas l'infiltration au sein des bas-côtés.

En résumé, 100% (ce résultat présente une fiabilité de 92%) du réseau au niveau duquel l'état de surface a été évalué (ce qui équivaut à 57,21% de « C ») étaient végétalisés, donc favorables à l'infiltration du point de vue l'état de surface.

Géométrie

Sur les filiales d'Estavayer-le-lac et de Thounne (« C » = 923,33 km), lors de l'évaluation de la géométrie, seuls 88,67% de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) ont été étudiés, car nous n'avons pas étudié ce critère au niveau des « bas-côtés non détectés » à l'aide de la méthode (11,20%). (88,67% = 34,71% favorable + 31,56% défavorable + 22,40% incertain, ces résultats présentent une fiabilité de 72%).

Le pourcentage de bas-côtés « favorables » du point de vue de la géométrie peut sembler faible sur l'ensemble du réseau appartenant aux filiales d'Estavayer-le-lac et de Thounne (923,33 km). Cependant, rappelons que les bas-côtés considérés comme « incertains » du point de vue de la végétation présentent une variation d'altitude inférieure à 0,2 mètres, ce qui en fait des bas-côtés facilement adaptables à l'infiltration des eaux de chaussées à l'aide de petits travaux.

Teneur en argile

Sur les filiales d'Estavayer-le-lac et de Thounne (« C » = 923,33 km), lors de l'évaluation de la teneur en argile seul 88,67% de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié Estavayer-le-lac) ont été étudiés, car nous n'avons pas étudié ce critère au niveau des « bas-côtés non détectés » à l'aide de la méthode (11,20%). (88,67% = 73,30% favorable + 15,47% défavorable, ces résultats présentent une fiabilité de 78%).

Le fait que 73,30% de « C » soient favorables à l'infiltration du point de vue de la teneur en argile montre que ce critère n'est pas un facteur limitant à l'infiltration des eaux de chaussées contrairement à ce que nous pouvions redouter avant l'évaluation, tant les résultats concernant ce critère étaient méconnus.

5.5 Résultats par critère et par source

Le seul potentiel d'infiltration ayant été évalué à l'aide de plusieurs types de sources est celui de « la teneur en argile » du sol des bas-côtés. Afin d'évaluer l'impact du type de source sur la qualité des résultats, nous avons calculé le taux de fiabilité en fonction du type de source.

Fig. 5.10 Résultats par critère et par source

Critère d'évaluation	Type de source	Statut de l'infiltration par les bas-côtés	Longueur RN concernée (en Km)	Fiabilité des résultats (en %)
Teneur en argile	Cartes pédologiques d'échelle moins détaillée que le 25'000ème	Favorable	139.34	81.81 (sur 44 points)
		Défavorable	48.90	
	Cartes pédologiques d'échelle plus détaillée que le 25'000ème	Favorable	117.69	73.68 (sur 38 points)
		Défavorable	49.48	
	expertise	Favorable	463.76	77.08 (sur 48 points)
		Défavorable	53.19	

Malgré les différences d'échelle et de nature qui existent entre les sources pédologiques utilisées, on remarque que les taux de fiabilité ne varient pas vraiment d'une source à l'autre. Toutefois, les cartes pédologiques* présentant une échelle moins détaillée que le 25'000ème semblent être les plus adaptées à ce type d'étude. De 38 à 44 points par source ont été pris en compte pour l'évaluation de la fiabilité de chacune des sources.

5.6 Résultats finaux

Après avoir détaillé les résultats concernant le potentiel d'infiltration en fonction de chaque critère pris séparément, nous allons présenter les résultats finaux concernant le potentiel d'infiltration en fonction de l'ensemble des 3 critères évalués (état de surface, géométrie et teneur en argile).

Fig. 5.11 Résultats finaux en fonction des 3 critères d'aptitude à l'infiltration (état de surface, géométrie et teneur en argile) au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac (F1) et de Thone (F2). Le potentiel d'infiltration n'a pas pu être évalué au niveau des bas-côtés n'ayant pas été détectés par la méthode. (« A » = nombre de kilomètres de bas-côtés théoriques au total ; « B » = nombre de kilomètres de bas-côtés hors zones d'ouvrages ; « C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié, pour plus d'informations sur le calcul du kilométrage de bas-côtés voir le paragraphe 1.5)

	Potentiel d'infiltration	longueur en fonction de « A » (en %)			longueur en fonction de « B » (en %)			longueur en fonction de « C » (en %)		
		F1 (987,27 Km)	F1 (606.71 Km)	F1+F2 (1593.97 Km)	F1+F2 (699.73 Km)	F2 (477.38K m)	F1+F2 (1177.1 1 Km)	F1 (603,40 Km)	F2 (378,92 Km)	F1+F2 (982,33 Km)
Résultat en fonction des 3 critères	Défavorable	26.38	17.73	23.09	37.22	22.53	31.26	43.16	28.39	37.46
	Favorable	15.24	22.03	17.82	21.50	28.00	24.13	24.93	35.28	28.92
	Incertain	14.30	13.03	13.82	20.18	16.56	18.71	23.40	20.86	22.42
Pourcentage de bas-côtés non évalué (au niveau des bas-côtés non détectés)		5.17	9.72	6.90	7.29	12.36	9.34	8.45	15.57	11.20

Au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac et Thoune, au total 28,92% de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) sont favorables à l'infiltration, 37,46% sont défavorables et 22,42% ont été classés dans la catégorie « infiltration incertaine ». Rappelons que le potentiel n'a pas pu être évalué au niveau des « bas-côtés non détectés » par la méthode de détection que nous avons élaborée. En effet, sur 8.45% du territoire d'Estavayer-le-lac et sur 15.57% du territoire de Thoune les bas-côtés n'ont pas pu être détectés (pourcentage en fonction de « C »).

Les résultats finaux concernant le potentiel d'infiltration vont être détaillés, en fonction de la typologie des critères d'aptitude à l'infiltration (état de surface, géométrie, teneur en argile), dans les deux tableaux ci-dessous, pour les catégories « défavorable », « favorable » et « incertain ». Ainsi, il sera possible de savoir quel est le critère, parmi les 3 choisis, qui limite le plus l'infiltration des eaux de chaussées au sein des bas-côtés.

Fig. 5.12 Résultats finaux détaillés (pourcentages en fonction de « C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) en fonction des 3 critères évalués (état de surface, géométrie et teneur en argile), au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoune

Potentiel d'infiltration au niveau de la filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune	Type d'État de surface (code)	Type de géométrie (code)	Type de Teneur en argile (code)	Kilométrage (en Km)	Kilométrage en fonction de « C » (en %)
Défavorable	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Supérieure à 25 % (2)	57,49	6,6
	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Inférieure à 25 % (2)	252,66	29,0
	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	57,88	6,6
	Végétalisé (1)	petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Supérieure à 25 % (2)	2,80	0,3
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Supérieure à 25 % (2)	7,36	0,8
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	26,03	3,0
Favorable	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	284,09	32,6
Incertain	Végétalisé (1)	Petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Inférieure à 25 % (1)	17,15	2,0
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Inférieure à 25 % (1)	38,44	4,4
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	128,46	14,7

Sur la filière d'Estavayer-le-lac et de Thoune, les tronçons « défavorables » à l'infiltration sont principalement dus à une géométrie de type déblai (27 % de « C »). Les tronçons « favorables » à l'infiltration représentent 32% de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié). Enfin, les tronçons qui présentent un potentiel « incertain » concernant l'infiltration des eaux de chaussées en leur sein sont dus à une géométrie de type « petit déblai puis remblai » (2 % de « C »), « plat incertain » (4 % de « C ») et « remblai incertain » (15 % de « C »). Les dénivelés présentés par ces trois derniers types de géométrie sont inférieurs à 0.2 mètres et la teneur en argile est favorable à l'infiltration au niveau de ce type de géométrie. Par conséquent, de simples **travaux visant à modifier la géométrie suffiraient à transformer ces 21% de « potentiel d'infiltration incertain » en « potentiel d'infiltration favorable ».**

Fig. 5.13 Résultats finaux détaillés (pourcentage en fonction de « C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) en fonction des 3 critères évalués (état de surface, géométrie et teneur en argile), au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac

Résultats concernant la filiale d'Estavayer-le-lac fonction de C	Type d'État de surface (code)	Type de géométrie (code)	Type de Teneur en argile (code)	Kilométrage (en Km)	Kilométrage en fonction de « C » (en %)
Défavorable	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Supérieure à 25 % (2)	56,33	11
	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Inférieure à 25 % (2)	148,06	30
	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	0,00	0
	Végétalisé (1)	petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Supérieure à 25 % (2)	2,80	1
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Supérieure à 25 % (2)	7,01	1
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	25,46	5
Favorable	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	150,42	30
Incertain	Végétalisé (1)	Petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Inférieure à 25 % (1)	8,78	2
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Inférieure à 25 % (1)	20,19	4
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	76,97	16

Sur la filière d'Estavayer-le-lac, les tronçons « défavorables » à l'infiltration sont principalement dus à une géométrie de type déblai (41% de « C »). Les tronçons « favorables » à l'infiltration représentent 30% de « C ». Enfin, les tronçons qui présentent un potentiel « incertain » concernant l'infiltration des eaux de chaussées en leur sein sont dus à une géométrie de type « petit déblai puis remblai » (2 % de « C »), « plat incertain » (4 % de « C ») et « remblai incertain » (16 % de « C »). Les dénivelés présentés par ces trois types de géométrie sont inférieurs à 0.2 mètres et la teneur en argile est favorable à l'infiltration au niveau de ce type de géométrie. **Par conséquent, de simples travaux visant à modifier la géométrie suffiraient à transformer ces 22% de « potentiel d'infiltration incertain » en « potentiel d'infiltration favorable ».**

Fig. 5.14 Résultats finaux détaillés (pourcentage en fonction de « C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié) en fonction des 3 critères évalués (état de surface, géométrie et teneur en argile), au niveau des filiales de Thoune

Résultats concernant la filiale de Thoune en fonction de C	Type d'État de surface (code)	Type de géométrie (code)	Type de Teneur en argile (code)	Kilométrage (en Km)	Kilométrage en fonction de « C » (en %)
Défavorable	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Supérieure à 25 % (2)	1,16	0,4
	Végétalisé (1)	Déblai (BC4)	Inférieure à 25 % (2)	103,47	32,7
	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	1,82	0,6
	Végétalisé (1)	petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Supérieure à 25 % (2)	0,35	0,1
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Supérieure à 25 % (2)	0,57	0,2
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Supérieure à 25 % (2)	0,00	0,0
Favorable	Végétalisé (1)	Remblai (CH1_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	132,23	41,7
Incertain	Végétalisé (1)	Petit déblai puis remblai (CH1_BC3)	Inférieure à 25 % (1)	8,08	2,5
	Végétalisé (1)	Plat incertain (CH2_BC??)	Inférieure à 25 % (1)	17,97	5,7
	Végétalisé (1)	Remblai incertain (CH2_BC1)	Inférieure à 25 % (1)	51,06	16,1

Sur la filière de Thoune, les tronçons « défavorables » à l'infiltration sont principalement dus à une géométrie de type déblai (33 % de « C »). Les tronçons « favorables » à l'infiltration représentent 41% de « C ». Enfin, les tronçons qui présentent un potentiel « incertain » concernant l'infiltration des eaux de chaussées en leur sein sont dus à une géométrie de type « petit déblai puis remblai » (2,5 % de « C »), « plat incertain » (6 % de « C ») et « remblai incertain » (16 % de « C »). Les dénivelés présentés par ces trois types de géométrie sont inférieurs à 0.2 mètres et la teneur en argile est favorable à l'infiltration au niveau de ce type de géométrie. **Par conséquent, de simples travaux visant à modifier la géométrie suffiraient à transformer ces 23% de « potentiel d'infiltration incertain » en « potentiel d'infiltration favorable ».**

5.7 Résultats finaux tenant compte des s de protection des eaux

Selon la loi sur la protection des eaux [1], l'infiltration est interdite en S1 (zone de captage) et S2 (zone de protection rapprochée) et est soumise à des critères restrictifs en S3 (zone de protection éloignée).

Afin de montrer l'impact des zones de protection des eaux sur le potentiel d'infiltration de la filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune, nous allons donner, dans un premier temps, **le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées en considérant qu'il est interdit d'infiltrer au sein des zones de protection des eaux de type S1 et S2**. Puis dans un deuxième temps, nous donnerons **le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées en considérant qu'il est n'est pas possible d'infiltrer au sein des zones de protection des eaux de type S1, S2 et S3**.

Fig. 5.15 Potentiel d'infiltration tenant compte du fait qu'il est impossible d'infiltrer en de protection des eaux S1 et S2 [1] (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié). Les valeurs entre parenthèses représentent les résultats de potentiel d'infiltration issus de la figure 5.11 qui ne tiennent pas compte de l'existence de zones de protection des eaux. Le potentiel d'infiltration n'a pas pu être évalué au niveau des bas-côtés n'ayant pas été détectés par la méthode

Potentiel d'infiltration	Pourcentage en fonction de « C » (%)		
	Filiale d'Estavayer-le-lac 603,40 Km	Filiale de Thoune 378,92 Km	Filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune 982,33 Km
Défavorable	42.97 (43.16)	28.09 (28.39)	27,41 (37.46)
Favorable	24.73 (24.93)	34.90 (35.28)	23,00 (28.92)
Incertain	23.35 (23.40)	20.59 (20.86)	16,94 (22.42)
Non évalué (bas-côté non détectés)	8.45	15.57	9,26

Sur la filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune, en considérant que l'infiltration des eaux de chaussées est interdite en zone S1 et S2 :

- Il est possible d'infiltrer les eaux de chaussées sur 23 % de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié).
- il est potentiellement possible d'infiltrer les eaux de chaussées au sein des bas-côtés sur 16,94% de « C », moyennant quelques petits travaux visant à modifier la géométrie (variations d'altitude inférieures à 0.2 mètres au niveau des bas-côtés incertains du point de vue de la géométrie).

Fig. 5.16 Potentiel d'infiltration tenant compte du fait qu'il est impossible d'infiltrer en de protection des eaux S1, S2 et S3 [1] (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié). Les valeurs entre parenthèses représentent les résultats de potentiel d'infiltration des eaux issus de la figure 5.11 qui ne tiennent pas compte de l'existence de zones de protection des eaux. Le potentiel d'infiltration n'a pas pu être évalué au niveau des bas-côtés n'ayant pas été détectés par la méthode

Potentiel d'infiltration	Pourcentage en fonction de « C » (%)		
	Filiale d'Estavayer-le-lac 603,40 Km	Filiale de Thoune 378,92 Km	Filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune 982,33 Km
Défavorable	41.67 (43.16)	27.90 (28.39)	26,83 (37.46)
Favorable	24.09 (24.93)	34.54 (35.28)	22,61 (28.92)
Incertain	22.98 (23.40)	20.18 (20.86)	16,64 (22.42)
Non évalué (bas-côté non détectés)	8.45	15.57	9,26

Sur la filiale d'Estavayer-le-lac et de Thoune, en considérant qu'il est impossible d'infiltrer au niveau des s S1, S2 et S3 :

- Il est possible d'infiltrer les eaux de chaussées sur 22,61% de « C » (« C » = nombre de kilomètres de bas-côtés réellement étudié).
- Il est potentiellement possible d'infiltrer les eaux de chaussées au sein des bas-côtés sur 16,64% de « C », moyennant quelques petits travaux visant à modifier la géométrie (variations d'altitude inférieures à 0.2mètres au niveau des bas-côtés incertains du point de vue de la géométrie).

En résumé, au niveau des filiales d'Estavayer-le-lac et de Thoune (982,33km), l'interdiction d'infiltrer les eaux de chaussées au niveau des zones de protection S1 et S2, fait chuter le potentiel favorable d'infiltration des eaux de chaussées au sein des bas-côtés de 28.92% à 23% de « C ».

Si la charge en polluants des eaux de chaussée ne permet pas de recourir à l'infiltration au niveau des zones de protection S3, le potentiel favorable d'infiltration des eaux de chaussées au sein des bas-côtés passe alors de 23% à 22.61% de « C ».

5.8 Représentation des résultats

La figure 5.17 et la figure 5.18 permettent d'illustrer la forme que prennent les résultats lorsqu'ils sont visualisés sous un guichet cartographique.

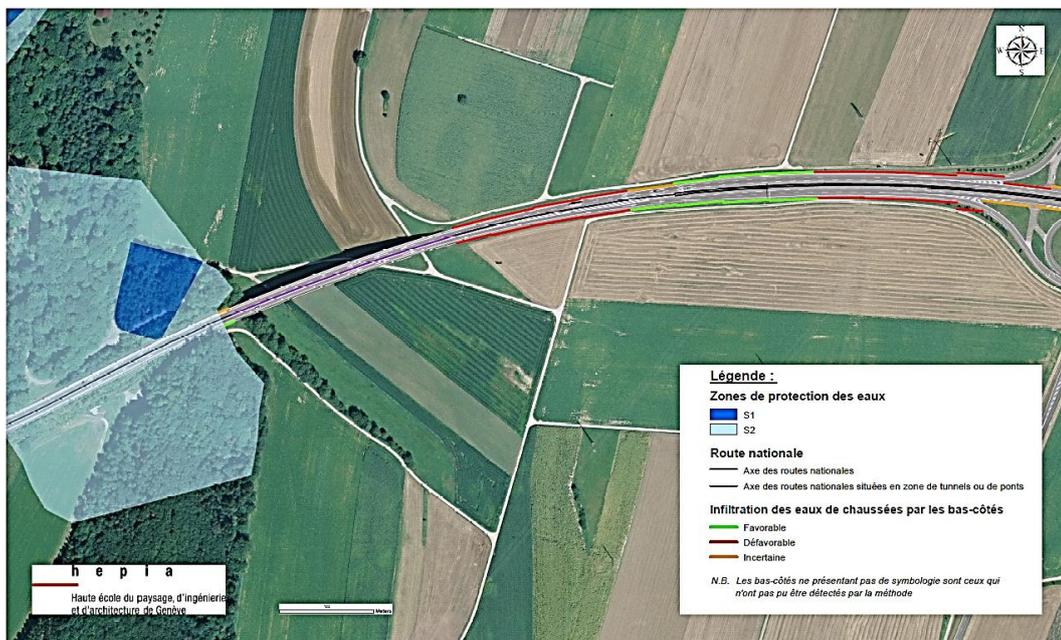


Fig. 5.17 Exemple de carte au 1/1'000 représentant le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les sols des bas-côtés sur l'A9, au Nord de Montcherand (filiale d'Estavayer-le-lac). (Cette carte a été générée à partir du jeu de donnée refermant les résultats d'infiltration des eaux de chaussées le long des RN que hepia a livré à l'OFROU.) Coordonnées géographiques en système Suisse CH 1903 : 529'957/177'231.



Fig. 5.18 Exemple de carte au 1/4'150 représentant le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les sols des bas-côtés sur la A9, au environs de Châteauneuf (filiale de Thoun). (Cette carte a été générée à partir du jeu de donnée refermant les résultats d'infiltration des eaux de chaussées le long des RN que hepia a livré à l'OFROU.) Coordonnées géographiques en système Suisse CH 1903 : 591'503/117'919.

6 Recommandations de mise en œuvre

6.1 Limites entre la typologie et les recommandations et la directive « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2]

La directive ASTRA 18005 sur le traitement des eaux de chaussées [2] exige une épaisseur d'horizons A et B de minimum 40 cm. Ce critère n'a pas pu être examiné par cartographie automatique car il ne peut être caractérisé que par voie directe sur le terrain (*in situ*), à l'aide de sondages tarières (des informations relatives à ces sondages sont disponibles au chapitre : cf. 6.2).

Cette limitation ne nous paraît pas déterminante. En effet (i) la recherche a montré que les eaux ne s'écoulent pas de bas en haut mais latéralement dans le bas-côté, de telle sorte que la couche traversée est en réalité très importante et (ii) les matériaux pédologiques sont en général suffisamment épais compte tenu de ce phénomène. En particulier l'horizon A est bien développé grâce à la végétation de prairie. La recommandation d'épaisseur ($A+B > 50\text{cm}$) est généralement respectée et est surtout indiquée pour les réalisations futures.

La résolution de cartographie adoptée dans cette étude distingue des tronçons de 50 m pour offrir un maximum de précision. Il est clair que différents impératifs de gestion et d'aménagement font qu'une zone d'infiltration limitée à 50 m n'est guère praticable. La conversion de la carte de potentiel en planification d'une infiltration effective est du ressort des filiales qui feront cette interprétation et décideront de la longueur minimale d'un tronçon d'infiltration.

6.2 Recommandations pour la mise en œuvre

Comme on l'a vu, la cartographie comporte des niveaux d'incertitude qu'il est difficile de réduire. Le but de cette section est d'expliquer comment utiliser la cartographie, quels contrôles simples effectuer sur site pour détecter les possibles erreurs, et enfin quelle démarche complémentaire est nécessaire avant la mise en œuvre concrète de l'infiltration.

Le critère d'acceptation est relativement fiable. Les zones cartographiées comme admissibles peuvent donc être retenues comme secteurs prioritaires dans un plan de réaménagement.

1. Contrôles à effectuer sur les secteurs défavorables

Pour les zones dont le critère de rejet est la géométrie, un contrôle visuel permet de vérifier si ce rejet est erroné en raison de la trop faible résolution du modèle numérique de terrain. Si sur ce secteur on trouve des tronçons de longueur significative en pente descendante même faible, avec un bas-côté de plus de 1 mètre d'extension, ils peuvent être ajoutés aux tronçons dits admissibles. De plus, comme on l'a vu plus haut, de faibles corrections topographiques permettraient de rendre admissible environ 20% de réseau supplémentaire (cf : 5.16). Il est donc particulièrement recommandé d'examiner ces portions de RN.

Dans les autres cas, il est très peu probable que l'infiltration soit admissible. Seule une erreur sur la texture des sols est possible a priori (Probabilité < 20 %) Si on souhaite s'en assurer, un spécialiste des sols devra intervenir et expertiser le tronçon au moyen de sondages à la tarière et de tests tactiles. Nous recommandons alors un sondage conforme (texture jugée acceptable) tous les 200 m environ pour déclarer un tronçon admissible.

2. Contrôles à effectuer sur les secteurs favorables

La classification comme admissible comporte un taux d'erreur faible (probabilité de classer comme admissible un tronçon qui ne l'est pas < 30 %). Avant mise en œuvre, différents points seront néanmoins à contrôler pour être en conformité avec la directive « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2]. Il faut se reporter à cette fiche pour la description des critères employés.

Points à contrôler :

- Conformité de la topographie (géométrie) et du couvert végétal (contrôle visuel).
- Quelques sondages à la tarière (environ 1 par km) permettent de décrire l'épaisseur de la couche de terre végétale* (horizon A) et celle de l'horizon sous-jacent. La description doit aussi mentionner l'épaisseur du feutrage racinaire en surface de la couche de terre végétale* (horizon A). Ce travail doit être confié à un spécialiste des sols. Ce dernier signalera des erreurs importantes sur la texture (sols à plus de 30% d'argile).
- Des mesures de conductivité hydraulique doivent permettre de contrôler si les valeurs de perméabilité souhaitées dans la directive « Traitement des eaux de chaussées pour des routes nationales » [2] sont atteintes. Le protocole de mesure recommandé est décrit ci-dessous. Une valeur de perméabilité sera mesurée chaque km au maximum, mais concrètement le spécialiste des sols pourra désigner les points représentatifs, en nombre limité. Par exemple si l'expertise de description du sol indique une bonne porosité, seuls les quelques points les moins favorables peuvent être mesurés. En revanche, à chaque point la mesure sera répétée pour limiter l'incertitude (voir protocole ci-dessous).
- L'examen du site doit en outre s'assurer de l'environnement. Peut-on installer un fossé infiltrant à la base du talus ? (recommandé). Quel serait l'impact d'une crue exceptionnelle ? Quel est le niveau de la nappe ? Tous ces points doivent être contrôlés en conformité avec les directives VSA relatives à la rétention et l'infiltration des eaux.

La présence d'une nappe peu profonde doit être discutée. Selon VSA, le niveau de la nappe ne doit pas être inférieur à 1 m sous la zone d'infiltration. Le cas des banquettes est particulier puisque l'infiltration se fait dans la banquette et non à sa base. Ainsi, on a prévu à la base des banquettes de l'A9 en Valais des fossés infiltrants alors que la nappe est parfois à moins de 1 m du fond du fossé. Mais on a montré que très peu d'eau de ruissellement de l'autoroute atteint effectivement le fossé. Il convient donc de s'assurer par un calcul hydrologique que seule une petite partie de l'eau est susceptible de ruisseler en bas de la banquette (en pratique c'est presque toujours le cas), et que les 40 premiers cm du fossé infiltrant, le cas échéant, ne sont jamais dans la nappe.

3. Protocole de mesure de la perméabilité

Il convient de réaliser une mesure de surface. Or la plupart des méthodes caractérisent une couche de sol épaisse [26] ou bien requièrent un sol horizontal (double anneau). De plus la variabilité de la conductivité hydraulique à saturation est connue pour être grande. Nous recommandons donc de travailler avec la méthode de l'infiltromètre à succion, et de répéter trois mesures en chaque point analysé. A défaut une mesure sur cylindre de sol non remanié est envisageable.

4. Calcul hydraulique

Le risque d'inondation par pluie exceptionnelle en bordure des RN doit être évalué et pallié. Un fossé de collecte en bas du bas-côté restera donc souvent nécessaire, sauf si les excès d'eau peuvent s'écouler dans des sites exempts de risque (prairie permanente, forêt). Le fossé de collecte devra préférentiellement être un fossé infiltrant comme réalisé sur l'A9.

Les standards de calcul du risque hydrologique en vigueur doivent être utilisés pour juger du dimensionnement du fossé de collecte aval (réalisation par un ingénieur spécialisé). En cas de fossé infiltrant (recommandé) ce fossé sera dimensionné pour réaliser à la fois les opérations de rétention et d'infiltration, de façon analogue à ce qui est indiqué dans VSA 2008 [21] [22]. Il pourra aussi être dimensionné en fonction de l'entretien de la végétation de type prairie qu'il portera.

7 Conclusions

La cartographie effectuée présente un taux d'erreur faible. Elle met en évidence une forte proportion de sites favorables à l'infiltration sur le total du réseau, et une forte proportion de sites qui peuvent le devenir moyennant un petit réaménagement sur la géométrie.

Par ailleurs, les zones en déblai pourront être utilisées dans le futur si un aménagement hydraulique approprié est mis au point. Dans ce cas, les données acquises dans ce projet pourront être utilisées.

L'acquisition des données nécessaires à la cartographie pose moins de problèmes qu'attendu, en ce qui concerne l'information sur les sols : l'expertise des pédologues locaux s'est révélée très fiable en l'absence de cartes.

L'utilisation de cette méthodologie sur l'ensemble du réseau RN ne devrait donc pas poser de problème particulier. Néanmoins, elle devrait faire l'objet d'une nouvelle estimation de fiabilité par contrôle de terrain pour parer à toute éventualité.

Enfin nous n'insisterons jamais assez sur l'intérêt de réaliser en bas de la banquette un fossé infiltrant. Ce dernier constitue en effet une rétention infiltration excellente et une garantie forte contre les risques liés aux accidents majeurs.

Annexes

I	Annexes	49
I.1	Problèmes rencontrés et solutions choisies concernant le choix du MNT approprié	49
I.2	Méthodes du test tactile	49
I.3	Méthodes d'analyse mécanique de la granulométrie par sédimentation en laboratoire (méthode de la pipette)	50
I.3.1	Principe	50
I.3.2	Matériel.....	50
I.3.3	Réactifs	50
I.3.4	Mode opératoire	50
I.4	Triangle textural de la FAO, 1968	51
I.5	Inventaire des MNT par canton.....	52
I.6	Cartographies des tronçons RN non ouverts le 10/11/2011	52

I Annexes

I.1 Problèmes rencontrés et solutions choisies concernant le choix du MNT approprié

La détection de fines variations d'altitude entre deux points relativement rapprochés nécessite l'utilisation d'un MNT* le plus précis possible, tant du point de vue planimétrique, que du point de vue altimétrique. Or, même pour un pays comme la Suisse, qui possède pourtant de nombreuses données SIG*, il est difficile de trouver un MNT de grande précision sur l'ensemble du territoire. Afin d'être en mesure de choisir le MNT que nous allons utiliser dans cette étude, nous avons fait l'inventaire des MNT disponibles pour l'ensemble du territoire Suisse d'une part et pour chacun des cantons que comprend notre secteur d'étude d'autre part. Les résultats de nos recherches effectuées début 2013 sont consignés dans le figure I.1.

Afin d'assurer une bonne homogénéité des résultats, nous avons choisi d'utiliser « swis-sATI3D » pour évaluer le potentiel d'infiltration des eaux de chaussées par les bas-côtés sur l'ensemble de notre secteur d'étude.

I.2 Méthodes du test tactile

TEST	RÉSULTAT	CONSÉQUENCE SUR LA TEXTURE
Toucher de la terre sèche	Soyeux ou talqueux	Abondance de limons fins
	Savonneux	Abondance de limons grossiers
	Rugueux	Sables grossiers
Réalisation d'un boudin de terre humide	Possible	Argile >10 %
	Impossible	Argile <10 %
Réalisation d'un anneau avec le boudin de terre	Fissuration avant 1/2 fermeture de l'anneau	Limons > Argile Argile <30 %
	Fissuration au 3/4 de la fermeture	Limons < Argile Argile <30 %
	Anneau réalisable	Argile >30 %

D'après A. Fleury et B. Fournier, INA P.G.

Fig. I.1 Test tactile élaboré par A. Fleury et B. Fournier de l'INA.

Nous nous sommes inspirés entre autres du test tactile élaboré par A. Fleury et B. Fournier de l'INA (institut national de recherches agronomiques) [24] et de la notre méthode est la suivante :

- 1) Humidifier légèrement les échantillons de sol sec et tamisé à 2mm,
- 2) Essayer de constituer un boudin de diamètre inférieur à 7mm de diamètre environ,
- 3) S'il est possible d'effectuer ce boudin c'est que le sol contient plus de 15 d'argile [5],
- 4) Essayer de transformer ce « boudin » de sol en anneau et suivre les consigne du tableau (cf. : fig.I.2) pour évaluer la teneur en argile granulométrique des sols.

Fig. I.2 Correspondance entre pourcentage d'argile et capacité de déformation du « boudin d'argile »

Test tactile pour les sols présentant plus de 15 d'argile granulométrique*.	Teneur en argile granulométrique* du sol	Correspondance avec la typologie
l'anneau se ferme	plus de 30	Infiltration impossible
Fissuration après demi-fermeture de l'anneau	entre de 25 et 30	Infiltration potentiellement possible
Fissuration avant demi-fermeture de l'anneau	moins de 25	Infiltration possible

Tous les échantillons classés dans la catégorie « Infiltration potentiellement possible » seront analysés au laboratoire (méthode) afin de vérifier la pertinence des critères tactiles utilisés.

I.3 Méthodes d'analyse mécanique de la granulométrie par sédimentation en laboratoire (méthode de la pipette)

Cette méthode permet d'obtenir les pourcentages corrigés, en fonction du taux de carbone organique, des cinq fractions granulométriques que présente le sol.

Fractions granulométriques :

- 1) argile (A < 2 μm)
- 2) limon fin (L de 2 μm à 20 μm)
- 3) limon grossier (U de 20 à 50 μm)
- 4) sable fin (SF de 50 μm à 0.2 mm)
- 5) le sable grossier (SG de 0.2 à 2 mm)

I.3.1 Principe

Cette méthode de mesure est basée sur la loi de Stokes.

Pour que la somme des fractions granulométriques du sol soit égale à 100% (m/m), il est nécessaire de détruire la matière organique avant de commencer la mesure.

I.3.2 Matériel

Balance analytique (au 0.001g), cylindre gradué de sédimentation de 500 mL, coupelle en aluminium (=7cm de diamètre) tarée, coupelle en porcelaine (=25cm de diamètre), tamis 0.05 mm, dispositif de chauffage, étuve à 105°C, chronomètre, dispositif de pipetage : pipette jaugée de 25 mL, pipetboy, carrousel, outil mécanique permettant de régler la hauteur de pipetage.

I.3.3 Réactifs

Eau déminéralisée, eau oxygénée 30%, Octanol, NaOH 400g/L (10M), hexameta-phosphate de sodium 10% (Calgon), eau déminéralisée.

I.3.4 Mode opératoire

Jour 1 : Les tubes gradués ont été numérotés en fonction du nombre d'échantillons à analyser. Chaque série de mesure comprend impérativement l'analyse de la terre témoin. Nos séries de mesures ne contenait pas plus de 17 échantillons, ce qui équivaut à la préparation de 18 tubes gradués en comptant le témoin. Tout d'abord, 20,00 g d'échantillons de sol, présentant une concentration en carbone organique humifié inférieure à 3%, ont été pesés et introduits dans les tubes. Pour les échantillons de sol présentant des concentrations en humus supérieures à 3%, seul 10,00g ont été pesés (les résultats sont ensuite rectifiés en fonction de ce changement). Puis, 100mL d'eau déminéralisée ainsi que 17mL d'eau oxygénée (répartis sur toute la journée) ont été ajoutés.

Jour 2 : Les tubes gradués ont été chauffés 1h30 thermostat 6, suivi de 1h à thermostat 10. En cas de risque de débordement d'un tube lors du chauffage, ajouter quelques gouttes d'octanol. Lorsque le chauffage est terminé sortir les tubes, ajouter 300mL d'eau déminéralisée et les laisser refroidir tranquillement.

Jour 3 : 0.1mL de NaOH suivi de 20mL de Calgon ont été introduits au sein de chaque tube gradué, puis la température d'un des tubes a été mesurée. La température mesurée détermine l'heure à laquelle les prélèvements des différentes fractions doivent être effectués. La profondeur de prélèvement reste inchangée pour une fraction granulométrique donnée. Elle dépend du dispositif de pipetage. La procédure avant le pipetage des limons grossier est la suivante : Le tube contenant l'échantillon qui va être analysé est bouché, puis énergiquement agité (veiller à ce qu'aucun résidu de terre ne reste collé au fond du tube). A l'heure exacte du début de l'analyse, le tube est posé sur le carrousel, à partir de cet instant et jusqu'au prélèvement des sables, le tube ne doit pas être soulevé du carrousel afin de ne pas perturber la sédimentation des particules en suspension.. 25mL de chaque fraction pipetée ont été introduits dans des coupelles en aluminium préalablement nommées et tarées. Une fois les argiles prélevées, le contenu du tube gradué a été versé sur les tamis de 50µm et de 0.2mm afin de récupérer les fractions de sable grossier et fin. Ces fractions ont été transvasées au sein des coupelles en aluminium qui leur étaient destinées. Pour finir, toutes les coupelles ont été introduites dans l'étuve à 105°C durant 24h puis pesées.

I.4 Triangle textural de la FAO, 1968

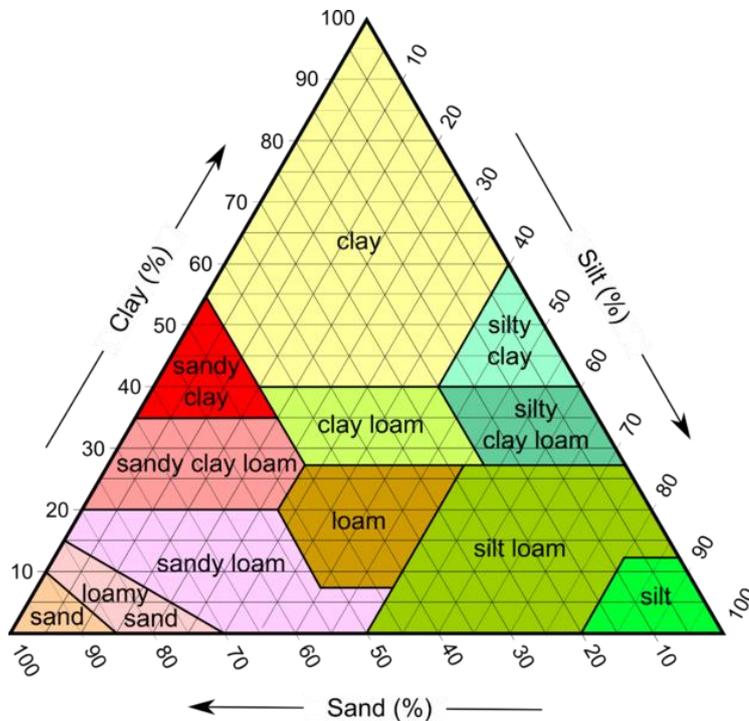


Fig. I.3 Triangle des textures de la FAO de 1968 (définition des fractions granulométriques utilisé en 1968: argile < 2µm ; limon entre 2µm et 50µm ;sable entre 50µm et 2000 µm) [25].

I.5 Inventaire des MNT par canton

Fig. I.4 Inventaire des MNT disponibles début 2013, par canton, au niveau de notre secteur d'étude (« n.r. » signifie : « non renseigné »)

Étendue géographique	MNT (image) disponible (seul le plus précis est cité)	Densité moyenne de points par m ²	Précision planimétrique* des points bruts (en m)	Précision altimétrique* des points bruts en m)	Technologie d'acquisition	Année(s) d'acquisition (dernière mise à jour)
Suisse [6]	swissALTI3D à 2m	0.5 (1 point/2m ²)	≈ 0.25 (en dessous de 2000m)	≈ 0.5 (en dessous de 2000m)	LIDAR*	2000 à 2010
Berne[6]	swissALTI3D à 2m	0.5 (1 point/2m ²)	≈ 0.25 (en dessous de 2000m)	≈ 0.5 (en dessous de 2000m)	LIDAR*	2000 à 2010
Jura bernois [8]	MNT-JU	4	≈ 0.30	≈ 0.20	LIDAR*	2011
Fribourg [13]	Modèles altimétriques = MNT-MO (FR)	1	n.r.	≈ 0.50	LIDAR*	2002
Genève [12]	«A.GEO_MNA_G RID_TERRAIN » 1	1	≈ 0.50	≈ 0.15 (surface dure) ; ≈ 0.50 (champs et forêts)	LIDAR*	2009
Jura [11]	MNT laser	1	≈ 0.30	≈ 0.20	LIDAR*	2001 à 2007
Neuchâtel [14]	« MNT laser 2010 »	0.4	≈ 0.30	≈ 0.20	LIDAR*	2010 à 2011
Valais[6]	swissALTI3D	0.5 (1 point/2m ²)	≈ 0.25 (en dessous de 2000m)	≈ 0.5 (en dessous de 2000m)	LIDAR*	2000 à 2010
Vaud [10]	Modèles numériques d'altitude	1	≈ 0.50	≈ 0.50		2001 à 2002 renouvellement prévu

I.6 Cartographies des tronçons RN non ouverts le 10/11/2011

Les tronçons RN non ouverts le 10/11/2011(encore en travaux) n'ont pas été prise en compte au sein de la d'étude.

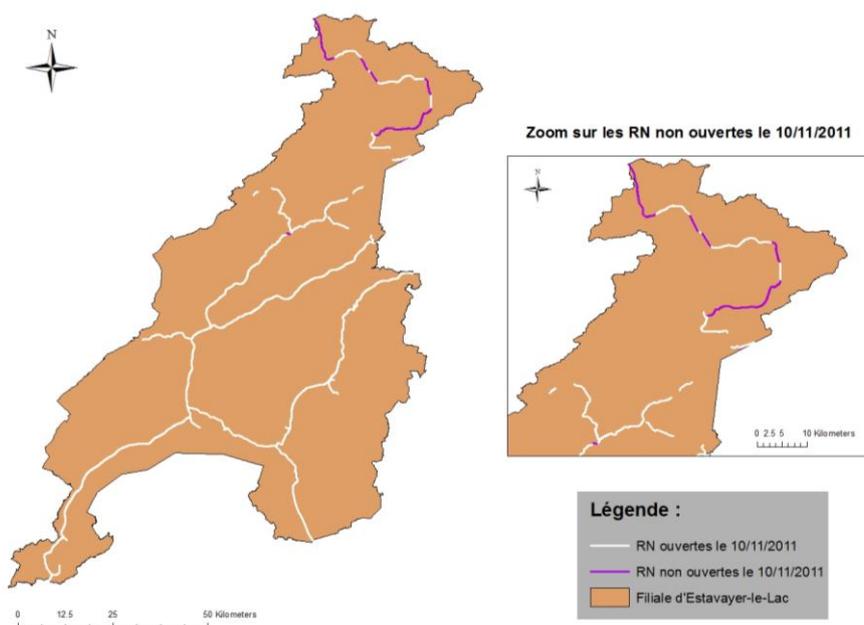


Fig. I.5 Cartographie des routes nationales de la filiale d'Estavayer-le-lac non ouvertes le 10/11/2011.

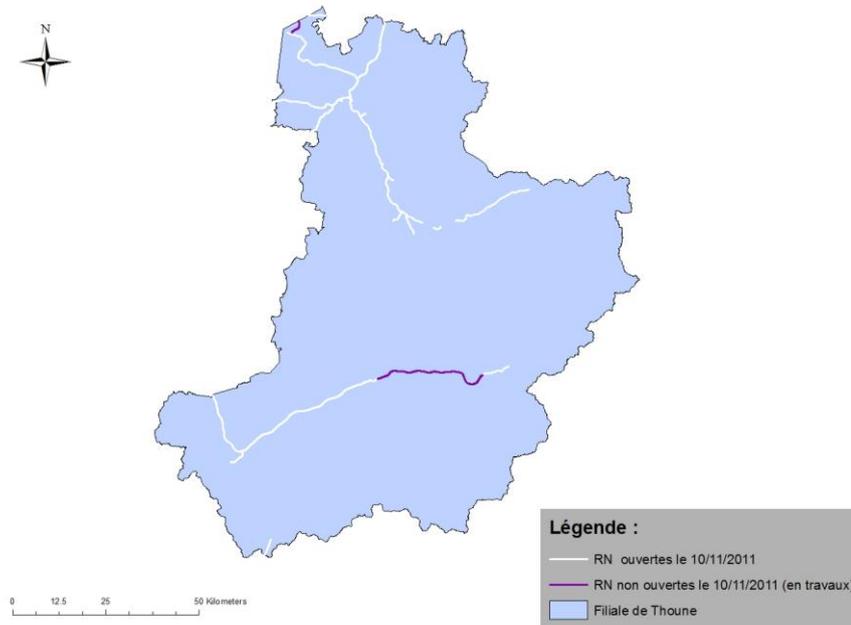


Fig. I.6 Cartographie des routes nationales de la filiale de Thoune non ouvertes le 10/11/2011.

Glossaire

Terme	Signification
argile *	Argile signifie dans ce rapport « argile granulométrique » ce qui correspond aux particules du sol de diamètre inférieur à 2µm
autoroute*	Route de grand transit à chaussées séparées
cartes pédologiques*	Carte localisant les différents types de sol d'une région
Chaussée*	Partie de la route destinée à l'accueil du trafic routier = partie praticable (bande + bande d'arrêt + autre largeur)
Classes texturales*	Elles sont définies par les triangles des textures propre à chaque pays.
FCIR*	Fausse Couleur Infra Rouge
Granulométrie*	Distribution des particules fines (<2mm) dans un sol
LIDAR*	Télémètre laser aéroporté
NDVI*	Indice de végétation
précision planimétrique*	Ecart entre la position des objets dans le jeu de donnée et la position vrai [23]
précision altimétrique*	Ecart entre l'altitude des objets dans le jeu de donnée et l'altitude vrai
RN*	Route nationale
semi-autoroute*	Route de grand transit à chaussées non séparées
SIG*	Systèmes d'information Géographique
terre végétale*	Terre riche en matière organique
voies de circulation*:	Voies sur lesquelles circulent les véhicules au niveau des RN.

Bibliographie

Ordonnances

- [1] Confédération suisse (1998), « **Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)** », *RS 814.201*, p.62, www.admin.ch.

Instructions et directives de l'OFROU

- [2] Office fédéral des routes OFROU (2013), « **Traitement des eaux de chaussée pour des routes nationales** », *directive ASTRA 18005, V1.00*, www.astra.admin.ch.

Documentation

- [3] Office fédéral de l'environnement OFEV (2001), « **Construire en préservant les sols** ».
- [4] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (2002), « **Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication** », *instruction*.
- [5] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (2001), « **Le sol cet inconnu** ».
- [6] Swisstopo (2012), « **swisstopo: swissALTI3D** », *consulté le: 28-févr-2013*.
- [7] Swisstopo (2012), « **MNT25** », *consulté le: 05-mars-2013*.
- [8] Office de l'information géographique du canton de Berne (2013), « **Géoportail du canton de Berne - Géocatalogue** ».
- [9] Office cantonal vaudois de l'urbanisme (1971), « **Carte écologique-physiographique des sols du canton de Vaud** ».
- [10] Système d'Information du Territoire de la Commune de Vevey et Service de la coordination et le cadastre de la Commune de Lausanne (2011), « **Canevas pour les préavis** ».
- [11] Système d'information du territoire jurassien (2008), « **Modeles numeriques de terrain laser** » *web*.
- [12] Système d'Information du Territoire Genevois (2011), « **MNA GRID terrain** », *web*.
- [13] Geocat et Système d'information du territoire fribourgeois (2002), « **MNT-MO (FR)** », *web*.
- [14] Système d'Information du Territoire Neuchâtelois, « **plaquette laser** », *web*.
- [15] Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura (1987), « **Etude d'impact sur l'environnement, Projet général (1/5000), N16, Sections 7 et 8 (Delémont-Ouest - Frontière JU-BE)** ».
- [16] Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura (1987), « **Etude d'impact sur l'environnement, Projet général (1/5000), N16, Sections 1-2-3 (Plate-forme douanière - Porrentruy Est)** ».
- [17] Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura (1988), « **Etude d'impact sur l'environnement, Projet définitif (1/1000), N16, Section 4 (Porrentruy-Est - Courgenay)** ».
- [18] Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura (1988), « **Etude d'impact sur l'environnement, Projet définitif (1/1000), N16, Section 6 (Glovelier - Delémont-Ouest)** ».
- [19] ArcGIS (2013), « **Fonction NDVI ArcGIS 10.1** », *web*.
- [20] ArcGIS (2013), « **Fonction NEAR ArcGIS 10.1** », *web*.
- [21] Association professionnelle pour l'eau en Suisse VSA (2008), « **Evacuation des eaux pluviales** », *web*.
- [22] Association professionnelle pour l'eau en Suisse VSA (2002), « **Directive sur l'infiltration, la rétention et l'évacuation des eaux pluviales dans les agglomérations** » *web*.
- [23] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques CERTU (2010), « **Commission de validation des données pour l'information spatialisée : Comment qualifier la précision et les notions d'échelles dans les métadonnées de nos séries de données ?** » *web*.
- [24] LCA (2013), « **AGRO REPORTER: Toucher terre (partie 1/3)** », *web*.
- [25] A. R. de Forges, C. Feller, M. Jamagne, et D. Arrouays (2008), « **Perdus dans le triangle des textures** », *Etudes et Gestion des Sols*, vol. 15, n° 2, p. 97-111, *web*.
- [26] A. Musy et M. Soutter (1991), « **Physique du sol** », *PPUR presses polytechniques*.
- [27] P. Boivin, M. Saadé, H. R. Pfeiffer, C. Hammecker, et Y. Degoumois (2008), « **Depuration of highway runoff water into grass-covered embankments** », *Environmental Technology*, vol. 29, n° 6, p. 709-720.
- [28] A. R. Dexter, G. Richard, D. Arrouays, E. A. Czyż, C. Jolivet, et O. Duval (2008), « **Complexed organic matter controls soil physical properties** », *Geoderma*, vol. 144, n° 3-4, p. 620-627.
- [29] Wikipedia (2013), « **Modèle numérique de terrain** », *web*.

Liste de modifications

Édition	Version	Date	Modifications
2014	1.00	21.01.2014	Publication de l' édition 2014.

