

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation /  
Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni /  
Ufficio federale delle strade

# Élaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux

**Erarbeitung einer Methode zur Spurrinnenprognose in bituminösen  
Belägen**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)  
Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC)**

Mehdi Ould-Henia, ing. dipl. ENP Alger  
Margarita Rodríguez, ing. dipl. EPFL  
André-Gilles Dumont, professeur

Mandat de recherche 12/98 sur proposition de  
l'Union suisse des professionnels de la route (VSS)

Août 2004

## Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>2</b>
1.1	PROBLEMATIQUE.....	2
1.2	OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	2
1.3	PROGRAMME DE L'ETUDE .....	2
<b>2</b>	<b>ETAT DES CONNAISSANCES.....</b>	<b>5</b>
2.1	CAUSES DE L'ORNIERAGE.....	5
2.2	MODELES PREDICTIFS DE L'ORNIERAGE EXISTANTS.....	6
2.2.1	L'orniéreur LPC testé sur les chaussées du Colorado [6].....	6
2.2.2	A statistical model of pavement rutting in asphalt concrete mixes [4].....	7
2.2.3	Relationship between Asphalt Binder Viscosity and Pavement Rutting [22].....	7
2.2.4	An analytically Based Approach to Rutting Prediction [12] [16] .....	9
2.2.5	Determining Pavement Layer Contributions to Rutting by Surface Profile Analysis [17] .....	10
2.2.6	Development of a pavement rutting model from experimental data [5].....	11
2.2.7	Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer [26] .....	12
2.2.8	Contribution des mesures rhéologiques sur liants à la prévision de l'orniérage en laboratoire [24].....	13
2.2.9	Recommended Performance-Related Specification for Hot-Mix Asphalt Construction: Results of the WesTrack Project [16].....	13
2.2.10	Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior [1] .....	14
2.2.11	Estimating the Rutting Potential of Asphalt Mixtures using Superpave Gyrotory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength [2] .....	15
2.2.12	Development of a Simple Method for the Prediction of Permanent Deformation of Asphalt in the Field [27] .....	16
2.2.13	Performance analysis of road infrastructure (PARIS) [39] .....	17
2.2.14	Méthode belge [19].....	19
<b>3</b>	<b>ETUDE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>20</b>
3.1	CHOIX DES SITES ET DES MATERIAUX A TESTER.....	20
3.2	MESURE DE LA PLANEITE TRANSVERSALE .....	21
3.3	PRELEVEMENT DES PLAQUES .....	24
3.4	ANALYSE DES MATERIAUX PRELEVES.....	25
3.4.1	Granulométrie .....	25
3.4.2	Liant.....	27
3.4.3	Enrobé bitumineux.....	27
3.5	ESSAI D'ORNIERAGE .....	28
3.6	RESULTATS DES ESSAIS.....	31
3.6.1	Vérification des résultats selon la norme SN 640 431b [34] .....	32
<b>4</b>	<b>CARACTERISATION DES SITES (TRAFIC, VITESSE, TEMPERATURE).....</b>	<b>35</b>
4.1	CHARGES DE TRAFIC .....	35
4.2	VITESSES DETERMINANTES .....	38
4.2.1	Mesure des vitesses réelles.....	38
4.2.2	Détermination des vitesses selon la norme SN 640 138a [32] .....	43
4.3	TEMPERATURE DETERMINANTE.....	44
4.3.1	Température du revêtement .....	45

---

<b>5</b>	<b>CORRELATIONS ENTRE L'ORNIERAGE ET LES DIFFERENTS PARAMETRES.....</b>	<b>47</b>
5.1	REPRESENTATIONS GRAPHIQUES ENTRE T ET LES PARAMETRES LIES AU MATERIAU.....	47
5.2	REPRESENTATIONS GRAPHIQUES ENTRE T ET LES PARAMETRES LIES AU TRAFIC .....	49
5.3	REPRESENTATIONS GRAPHIQUES ENTRE T ET LA TEMPERATURE.....	50
<b>6</b>	<b>DEVELOPPEMENT DE LA METHODE DE PREDICTION DE L'ORNIERAGE.....</b>	<b>51</b>
6.1	INTRODUCTION.....	51
6.2	PARAMETRES LIES AUX MATERIAUX.....	53
6.3	PARAMETRES LIES AU TRAFIC .....	54
6.3.1	Charge de trafic .....	54
6.3.2	Vitesse des véhicules .....	55
6.4	PARAMETRE LIE A L'ENVIRONNEMENT DU SITE .....	57
6.5	CALCUL PREDICTIF DES ORNIERES .....	59
6.6	MARCHE A SUIVRE DE LA METHODE .....	61
<b>7</b>	<b>VERIFICATION DE LA METHODE ET EXEMPLE D'APPLICATION.....</b>	<b>64</b>
7.1	MATERIAUX ANALYSES .....	64
7.2	TRAFIC DETERMINANT .....	64
7.2.1	Site 1.....	65
7.2.2	Sites 2 et 3.....	67
7.2.3	Site 4.....	69
7.2.4	Vue d'ensemble .....	71
7.3	TEMPERATURES DETERMINANTES .....	71
7.4	VITESSES DETERMINANTES .....	72
7.5	INTEGRATION DES POINTS DANS LA METHODE PREDICTIVE.....	72
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>76</b>
<b>10</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>79</b>
10.1	MESURE DE LA PLANEITE TRANSVERSALE .....	79
10.2	COURBES GRANULOMETRIQUES.....	89
10.3	RESULTATS NUMERIQUES DE L'ORNIEREUR LPC .....	95
10.4	COURBES D'ORNIERAGE.....	101
10.5	CALCUL DU TRAFIC PONDERAL EQUIVALENT .....	112

## Liste des figures

Figure 1: Organigramme de l'étude.....	4
Figure 2: Forme du questionnaire envoyé aux administrations cantonales.....	20
Figure 3: Localisation des sites retenus.....	21
Figure 4: Mesure de la planéité transversale [36].....	22
Figure 5: Premier plan de prélèvement des planches d'essai.....	24
Figure 6: Second plan de prélèvement des planches d'essai.....	25
Figure 7: Localisation des points de mesure.....	29
Figure 8: Allure des courbes d'orniérage.....	30
Figure 9: Ornières à 10'000 cycles (toutes températures).....	33
Figure 10: Ornières à 30'000 cycles (toutes températures).....	34
Figure 11: Trafic pondéral équivalent annuel (tous sites confondus).....	37
Figure 12: Trafic pondéral équivalent total (tous sites confondus).....	37
Figure 13: Mesures prises durant la phase d'approche du véhicule.....	40
Figure 14: Mesures prises durant la phase d'éloignement du véhicule.....	40
Figure 15: Valeurs moyennes de toutes les mesures de vitesse.....	41
Figure 16: Mesure des vitesses réelles.....	41
Figure 17: Localisation des valeurs acceptées, isolées et aberrantes (Test de Grubbs [29])......	42
Figure 18: Vitesse des véhicules lents en déclivité [32].....	43
Figure 19: Représentation de T [mm] en fonction du point de ramollissement anneau et bille [°C]......	48
Figure 20: Représentation de T [mm] en fonction de la teneur en vides moyenne [%]......	48
Figure 21: Représentation de T [mm] en fonction de la charge de trafic [ESAL]......	49
Figure 22: Représentation de T [mm] en fonction de la vitesse des véhicules [km/h]......	49
Figure 23: Représentation de T [mm] en fonction de la température du sol [°C] (selon [3])......	50
Figure 24: Exemple de courbe d'orniérage dans un système d'axes logarithmiques.....	51
Figure 25: Coefficient de vitesse $C_v$ .....	57
Figure 26: Coefficient de température $C_\theta$ .....	58
Figure 27: Valeur des ornières calculées et effectives pour tous les sites.....	60
Figure 28: Relation entre les ornières calculées et les ornières mesurées.....	61
Figure 29: Organigramme pour l'application de la méthode de prédiction de l'orniérage.....	63
Figure 30: Mesure des ornières in situ (min, max, moyenne).....	64
Figure 31: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL (site 1).....	66
Figure 32: Trafic équivalent total sur le site 1.....	67
Figure 33: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL (sites 2 et 3).....	68
Figure 34: Trafic équivalent total sur les sites 2 et 3.....	69
Figure 35: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL.....	70
Figure 36: Trafic équivalent total sur les sites 4.....	71
Figure 37: Valeurs des ornières mesurées in situ et calculées par le modèle.....	72
Figure 38: Valeurs des ornières des matériaux initiaux et des matériaux de vérification.....	73

## Liste des tableaux

Tableau 1: Informations transmises par les cantons .....	21
Tableau 2: Valeurs des ornières en place.....	23
Tableau 3: Données concernant les échantillons prélevés .....	24
Tableau 4: Granulométries des plaques prélevées (% passant par le tamis).....	26
Tableau 5: Taille maximale des granulats.....	26
Tableau 6: Valeurs caractéristiques des bitumes.....	27
Tableau 7: Valeurs caractéristiques des enrobés .....	28
Tableau 8: Valeurs limites recommandées pour la profondeur d'ornière [34] .....	31
Tableau 9: Equations d'orniérage issues des essais .....	32
Tableau 10: Valeurs de l'ornière à 10 000 et 30'000 cycles.....	34
Tableau 11: Facteurs d'équivalence moyens du trafic lourd selon le type de route [33] .....	36
Tableau 12: Répartition du trafic pondéral total en fonction du nombre de voies [33].....	36
Tableau 13: Trafic pondéral équivalent total calculé .....	36
Tableau 14: Mesures des vitesses (phases d'approche et d'éloignement du véhicule).....	39
Tableau 15: Mesure des vitesses réelles et caractérisation de tout l'échantillon. ....	43
Tableau 16: Nouvelle caractérisation de l'échantillon. ....	43
Tableau 17: Vitesses des poids lourds d'après la Figure 18 extraite de la norme [32].....	44
Tableau 18: Vitesses des poids lourds selon diverses méthodes .....	44
Tableau 19: Températures régionales de base et gradients de température [3][1].....	45
Tableau 20: Valeurs correctives d'après la situation locale [3].....	46
Tableau 21: Coefficients régionaux [3][1].....	46
Tableau 22: Calcul des écarts-types standards [3] .....	46
Tableau 23: Définition des régions et des situations des lieux de prélèvement .....	47
Tableau 24: Calcul des températures maximales .....	47
Tableau 25: Paramètres $\alpha$ et $\beta$ pour les essais à 50°C .....	54
Tableau 26: Tableau récapitulatif des caractéristiques prises en compte.....	60
Tableau 27: Caractérisation des matériaux de vérification .....	64
Tableau 28: Calcul du pourcentage PL moyen (site 1) .....	65
Tableau 29: Trafic pondéral équivalent total (site 1) .....	66
Tableau 30: Calcul du pourcentage PL moyen (sites 2 et 3).....	67
Tableau 31: Trafic équivalent total (sites 2 et 3) .....	68
Tableau 32: Calcul du pourcentage PL moyen (site 4) .....	69
Tableau 33: Trafic équivalent total (site 4) .....	70
Tableau 34: Charges de trafic sur tous les sites .....	71
Tableau 35: Détermination des températures maximales selon [3]. ....	72
Tableau 36: Valeurs déterminantes pour l'utilisation de la méthode. ....	72

## RESUME

L'étude présentée dans ce rapport décrit le développement d'une méthode qui permet de prédire la profondeur d'ornièrerie moyenne d'une chaussée. L'objectif principal de cette étude est de pouvoir prédire, à plus ou moins long terme, le risque d'orniérage d'une chaussée à partir des caractéristiques du revêtement bitumineux, de la charge de trafic, de la vitesse moyenne des poids lourds et des conditions climatiques du site. Le trafic est constitué de la charge de trafic lourd, exprimé en essieux équivalents, qui a sollicité la chaussée au cours de sa période de service. La vitesse moyenne de déplacement des poids lourds sur le tronçon considéré apporte une information sur le temps de chargement. Le revêtement bitumineux est pris en compte par le paramètre de résistance à l'orniérage du matériau mesuré au simulateur de trafic LPC.

Une campagne d'essais de laboratoire au simulateur de trafic LPC a été réalisée sur des échantillons de revêtement prélevés sur des chaussées en service pendant des durées variables. Dans le but de disposer d'un échantillonnage général, représentatif des chaussées en Suisse, un ensemble de revêtements a été choisi. Ces revêtements traduisent les différents types de sollicitations climatiques en Suisse, ainsi que les spécificités du trafic poids lourd.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die in diesem Bericht vorgestellte Studie beschreibt die Entwicklung einer Methode, welche die Vorhersage der durchschnittlichen Spurrinnentiefe erlaubt. Das Hauptziel besteht darin, das Spurrinnenbildungsrisiko einer Fahrbahn anhand der Eigenschaften des bituminösen Belags, der Verkehrslast, der Durchschnittsgeschwindigkeit der Lastwagen und der Umgebung des Standortes vorhersagen zu können. Der massgebende Verkehr besteht hauptsächlich aus der Schwerverkehrslast, in Referenzachsen ausgedrückt, welche die Fahrbahn während ihrer Betriebsdauer belastet hat. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Lastwagen auf dem untersuchten Abschnitt bringt eine zusätzliche Information bezüglich der Belastungsdauer. Der bituminöse Belag wird mit Hilfe des Widerstands gegen Spurrinnenbildung des am LPC-Verkehrssimulator untersuchten Materials in die Berechnung einbezogen.

Eine Reihe von Laborversuchen am LPC-Verkehrssimulator wurde an Probekörpern von Fahrbahnen mit unterschiedlicher Betriebsdauer durchgeführt. Um über einen möglichst repräsentativen Querschnitt der schweizer Strassen zu verfügen, wurden verschiedene Beläge ausgesucht. Diese Beläge stehen zudem für verschiedene klimatische Einflüsse, wie auch für eine unterschiedliche Verkehrsbelastung.

## ABSTRACT

The study presented in this report describes the development of a method which makes possible to predict the pavement mean rutting depth. The main objective of this study is to be able to predict the rutting risk of a pavement from the bituminous pavement characteristics, the traffic load, the heavy vehicles mean speed and site climatic conditions. The traffic is constituted by the heavy traffic load expressed by equivalent axles which passed on the pavement during its service period. The mean speed adopted by heavy vehicles on the considered section provides some information about the loading time. The bituminous pavement is taken into account by the material resistance to rutting parameter measured with the LPC traffic simulator.

Various laboratory tests were carried out with the LPC traffic simulator on pavement samples taken from roadways that were in service for variable lengths of time. With the aim of having a representative sampling of the Swiss roadways, different types of pavements were selected. The pavements represent the variability and the range of climatic solicitations in Switzerland, as well as the specificities of heavy traffic.

# 1 Introduction

## 1.1 Problématique

La présence d'ornières sur les routes a toujours été et continue d'être un problème pour la performance des enrobés bitumineux qui composent la chaussée. L'orniérage diminue non seulement la période de service des routes mais crée un danger pour la sécurité des automobilistes. L'accroissement du trafic, et plus particulièrement de la quantité de poids lourds, l'augmentation de la charge transportée, l'apparition de pneus simples en remplacement des jumelages ou encore l'augmentation de la pression des pneus induisent des efforts considérables au sein des couches bitumineuses. Celles-ci atteignent rapidement leurs limites de résistance aux déformations permanentes, ce qui conduit à un affaissement de la chaussée aux endroits de passage des roues des véhicules.

L'apparition de nombreux cas d'orniérage catastrophiques sur autoroute a incité très récemment l'introduction dans plusieurs normes relatives aux enrobés l'obligation de procéder, dans certains cas, à l'essai d'orniérage. Il s'agit en particulier de la nouvelle norme SN 640 432a "Couches de roulement en Splittmastixasphalt, Conception, exigences, exécution" et de la norme SN 640 431b "Revêtements en béton bitumineux, Conception, exigences, exécution".

Depuis plusieurs années afin de prévenir les risques d'orniérage, les gestionnaires de réseaux mettent en œuvre de nouveaux matériaux prometteurs comme les Splittmastixasphalt (SMA), les Macrorugueux (MR) ou les enrobés à module élevé (EME). Ces matériaux, supposés peu susceptibles à l'orniérage, sont cependant très sensibles à la formulation et aux variations de performance de leurs composants comme le liant, le filler et les granulats qui, mal maîtrisés, peuvent conduire à un risque d'orniérage prématuré.

## 1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de pouvoir prédire, à plus ou moins long terme, le risque d'orniérage d'une chaussée à partir des caractéristiques du revêtement bitumineux, de la charge de trafic, de la vitesse moyenne des poids lourds et des conditions climatiques du site. Le trafic est constitué de la charge de trafic lourd, exprimé en essieux équivalents, qui a sollicité la chaussée au cours de sa période de service. La vitesse moyenne de déplacement des poids lourds sur le tronçon considéré apporte une information sur le temps de chargement. Le revêtement bitumineux est pris en compte par le paramètre de résistance à l'orniérage du matériau mesuré au simulateur de trafic LPC.

## 1.3 Programme de l'étude

En première étape, un inventaire de chaussées non exhaustif a été réalisé en vue d'effectuer des prélèvements in situ afin de pouvoir les tester au simulateur de trafic. Le revêtement ne devait pas dépasser 10 ans d'âge et présenter divers niveaux d'ornières. La localisation des matériaux choisis devait couvrir l'ensemble du territoire helvétique et être représentative des diverses conditions climatiques possibles (Plateau, Jura, Alpes, Tessin). L'inventaire a donc été réalisé en tenant compte des critères suivants:

- matériau (type d'enrobé bitumineux)
- âge de la couche de surface (<10 ans)
- charge et type de trafic
- conditions climatiques (Plateau, Jura,...)
- profondeur d'ornière

Une fois les chaussées sélectionnées, des plaques de revêtement ont été prélevées, après avoir soigneusement relevé la profondeur d'ornière aux endroits de prélèvement. Les plaques prélevées ont fait l'objet d'analyses approfondies dans le but de connaître leur composition et leur degré de compactage. Ces échantillons prélevés in situ ont ensuite été soumis à l'orniéreur LPC à différentes températures. En parallèle, pendant la réalisation des essais de laboratoire, les données climatiques ainsi que les caractéristiques de trafic aux abords des zones de prélèvement des échantillons ont été collectées.

La dernière étape a consisté à mettre au point un modèle permettant de mettre en évidence la relation entre la profondeur d'ornière in situ en fonction du volume de trafic, de la vitesse des poids lourds, des conditions climatiques et du taux d'orniérage mesuré en laboratoire sur les échantillons soumis à l'orniéreur LPC.

La vérification du modèle de prédiction mis au point a été menée à bien en y introduisant les données supplémentaires d'autres matériaux non considérés au départ dans cette étude.

Ce modèle prédictif a permis de modéliser le comportement des enrobés soumis l'essai d'orniérage à l'aide d'un outil analytique. Le modèle de réponse mis au point, basé sur diverses caractéristiques du site considéré, du trafic ainsi que des conditions climatiques, permet d'évaluer la susceptibilité à l'orniérage d'un matériau in situ à travers la simple connaissance de la résistance à l'orniérage de l'enrobé étudié ou de la formulation choisie.



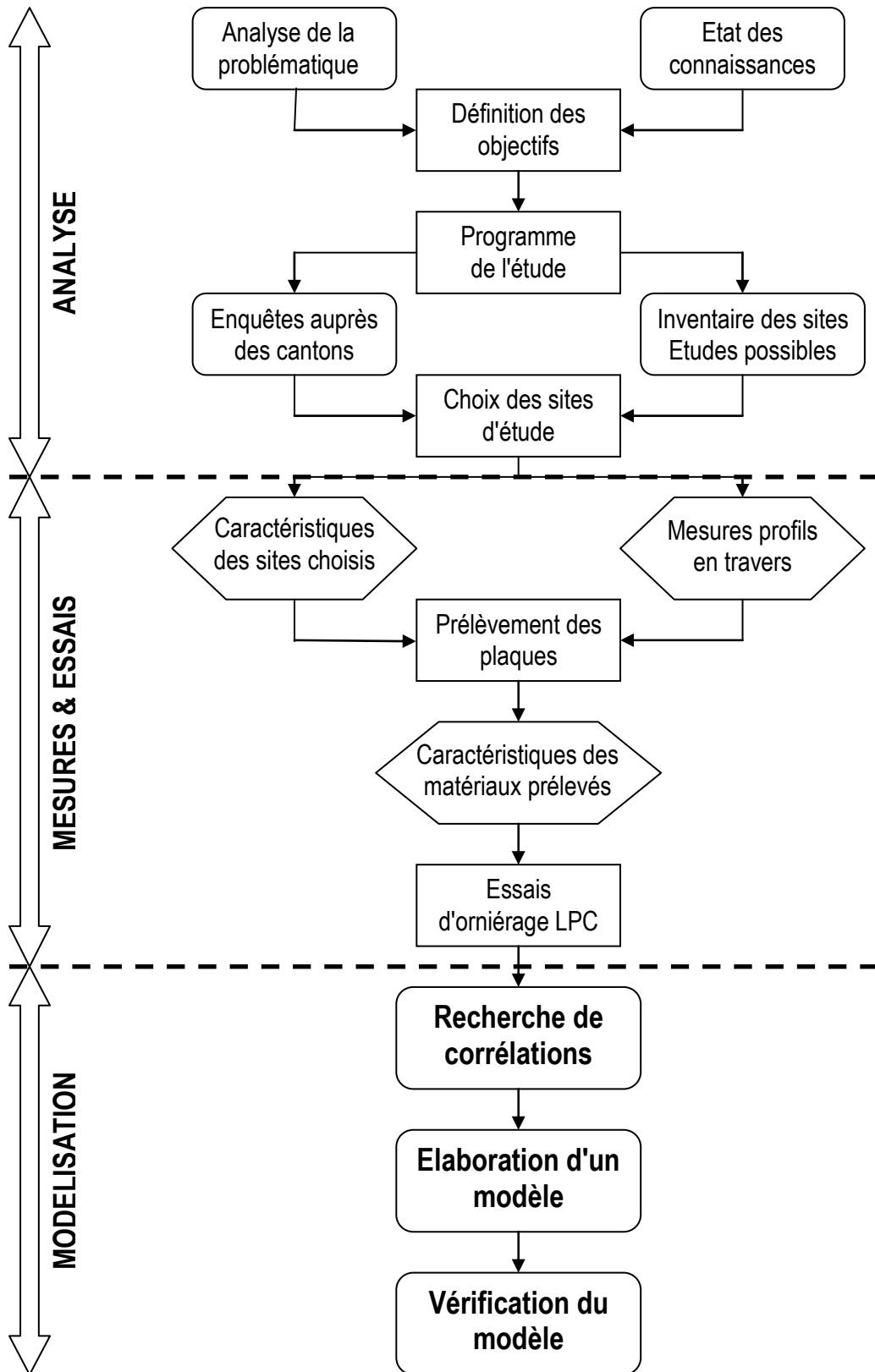


Figure 1: Organigramme de l'étude

## 2 Etat des connaissances

### 2.1 Causes de l'orniérage

Les ornières se développent lorsque les sollicitations agissant à la surface du revêtement bitumineux sont telles qu'elles induisent des contraintes de cisaillement à l'intérieur des matériaux qui composent les différentes couches de la chaussée. Ce phénomène provoque une densification des différents matériaux présents dans les couches aux endroits de passage des roues des véhicules. Les recherches menées jusqu'ici ont montré que les différents paramètres qui influencent le mode d'orniérage d'une chaussée peuvent se classer en quatre groupes [5] [7]:

Paramètres liés au **trafic**:

Nombre de poids lourds, type et l'agressivité du véhicule lourd, charge à l'essieu, vitesse du véhicule

Paramètres liés à la **géométrie de la route**:

Profil en long, profil en travers, tracé en situation, zones particulières (ralentissements, feux, etc.)

Paramètres liés au **climat**:

Intensité et durée d'ensoleillement journalier, intensité et durée des plus hautes températures

Paramètres liés aux **matériaux** qui composent la chaussée:

Caractéristiques de l'enrobé bitumineux: Provenance, épaisseur des différentes couches, teneur en bitume, teneur en vides, degré de compactage, pourcentage d'humidité, susceptibilité à la température, mode de mise en place

Caractéristiques du squelette minéral: Granulométrie, type des granulats, forme des granulats, mode de concassage, angularité, contenu et qualité des fines

Caractéristiques du bitume: Contenu, Nature physico-chimique, Viscosité, Adhésivité

Tous les paramètres précités n'ont pas la même incidence sur l'évolution de l'orniérage des chaussées. En effet, le pourcentage des poids lourds présents dans le trafic influence de manière déterminante l'orniérage. Il faut noter que cet effet est d'autant plus accentué que des changements interviennent dans les types de poids lourds présents sur le marché automobile. Il a été constaté que les essieux tridem aggravent visiblement et de manière déterminante l'orniérage des chaussées. Celui-ci passe d'un état de double orniérage symétrique dans chaque bande roulement à un orniérage dissymétrique comportant une ornière nettement plus profonde sur la partie extérieure de la bande de roulement. D'après [7] l'orniérabilité du poids lourd tridem est quatre fois supérieure à celle du poids lourd classique et une variation de charge qui passe de 40 à 46 tonnes multiplie le risque d'orniérage par cinq. De même, l'effet d'une variation de vitesse, liée généralement à la déclivité, peut être néfaste au point de multiplier le risque d'orniérage par cinq si le poids lourd passe d'une vitesse de 90 km/h à une vitesse de 30 km/h.

Le caractère visqueux du bitume fait que la température ambiante peut avoir de fortes répercussions sur le taux et l'évolution de l'orniérage d'une chaussée [9] [7]. Pendant les étés très chauds de 1994 et 1995, des cas d'orniérage sévère ont pu être observés en France sur des matériaux sans ornières visibles et en place

depuis plusieurs années. La détermination de l'influence de la température étant difficile à évaluer, deux facteurs apparaissent comme pertinents selon [7]:

- la température de l'enrobé à 2 cm sous la surface
- la température moyenne des quatre jours les plus chauds de l'année

Le type et le dosage en liant influencent également l'orniérage. Plus un bitume est dur et moins l'enrobé sera sensible à l'orniérage. De même, plus l'enrobé contient un dosage élevé en liant, plus il aura un comportement visqueux et une sensibilité accrue à l'orniérage. Des études menées entre 1977 et 1998 par le LCPC sur le manège de Nantes [10] ont montré que l'emploi de bitumes durs et de bitumes "multigrades" améliorent significativement la résistance à l'orniérage. Il s'avère également que les bitumes polymères améliorent les performances face à l'orniérage [9].

La forme des granulats, le type de concassage [7] ainsi que la nature pétrographique du squelette minéral [9] peuvent avoir des effets déterminants. Globalement, on observe que plus les granulats ont une forme arrondie et plus l'orniérabilité augmente.

Le degré de compactage peut également expliquer une partie des causes jouant un rôle dans la formation d'ornières [7] [11] [21] [25]. En effet, il a été montré à l'aide de l'orniéreur LPC qu'un même enrobé testé à différents degrés de compactage peut avoir des comportements très différents face à l'orniérage. Ces différences de comportement sont plus ou moins conditionnées par le degré de maniabilité des enrobés, lui-même fortement dépendant de la teneur en liant et des caractéristiques du squelette minéral.

## **2.2 Modèles prédictifs de l'orniérage existants**

### **2.2.1 L'orniéreur LPC testé sur les chaussées du Colorado [6]**

En 1990, un groupe formé de plusieurs associations américaines concernées par la construction routière a visité l'Europe pour identifier les différents domaines d'amélioration potentielle des chaussées bitumineuses, dont l'utilisation d'essais liés à la performance. L'orniéreur LPC a ensuite été choisi pour être testé dans l'état du Colorado et ainsi vérifier la capacité de prédiction de cet équipement pour les conditions locales.

Les sites choisis étant d'anciens revêtements dont les teneurs en vides et les liants avaient évolué depuis la construction de la chaussée, les conclusions suivantes concernant la capacité de prédiction de l'orniéreur LPC ont pu être tirées:

- La spécification française est trop sévère pour la majorité des sites choisis dans l'état du Colorado. Onze sites sur quinze n'ont pas satisfait les critères de la norme française malgré un bon comportement in situ. Néanmoins, tous les sites ayant satisfait la spécification n'ont présenté aucune ornière sur le terrain.
- En procédant à des modifications de la température d'essai pour mieux s'adapter aux différentes conditions rencontrées dans le Colorado, la corrélation entre la spécification française et les performances sur le terrain s'est grandement améliorée.
- La corrélation entre les résultats issus de l'orniéreur LPC et les profondeurs d'orniérage relevées sur le terrain sont excellentes si la température et le trafic du site sont pris en ligne de compte.

### 2.2.2 A statistical model of pavement rutting in asphalt concrete mixes [4]

Cette étude présente le développement d'un modèle empirique décrivant la progression de l'orniérage sur la base de données expérimentales extraites du "WesTrack Road Test". Trois conclusions générales sont issues de cette étude:

1. Trois propriétés des enrobés bitumineux sont suffisantes pour modéliser leur performance:
  - a. Un indice de gradation obtenu à partir de la granulométrie
  - b. Le pourcentage de vides remplis par le bitume, obtenu pour l'enrobé utilisé dans la presse à cisaillement giratoire Superpave
  - c. Le pourcentage initial de vides in situ
2. Le modèle tient compte des effets des hautes températures ambiantes
3. Le modèle prédit les profondeurs d'ornières en ajoutant des valeurs prédites d'incrément de profondeur d'ornière pour chaque période de temps

Le modèle obtenu est non linéaire dans les variables et les paramètres et est estimé en tenant en compte les effets aléatoires. Les résultats de l'estimation et les tests prédictifs montrent qu'il reproduit bien le comportement observé dans l'enrobé dans le cadre du "WesTrack Road Test".

L'équation du modèle est:

$$RD_{it} = \gamma_{i10} + \sum_{s=1}^t m_{is} e^{\gamma_7 N_{is}} \Delta N_{is} \quad (2.1)$$

où  $RD_{it}$  est la profondeur d'ornière de la section  $i$  au temps  $t$

$\gamma_{i10}$  l'ornière initiale

$N_{is}$  le nombre d'essieux équivalents à la période  $s$

$m_{is}$  et  $\gamma_7$  des paramètres de l'enrobé et de la température.

Le modèle prédit l'orniérage en ajoutant la valeur calculée à chaque incrément de temps. Malgré les résultats présentés, ce modèle est limité du fait qu'il ne représente que les matériaux utilisés au "WesTrack Road Test", et qu'il ne peut pas s'appliquer aux ornières dues aux déformations des couches inférieures. Enfin, les données expérimentales peuvent ne pas représenter le vrai mécanisme de détérioration d'un enrobé en place en raison de la variabilité du type de trafic, de la vitesse et du vieillissement des matériaux.

### 2.2.3 Relationship between Asphalt Binder Viscosity and Pavement Rutting [22]

Cette étude présente la relation entre la viscosité du liant bitumineux et les performances d'un enrobé bitumineux face à l'orniérage. Le concept principal de l'étude est basé sur le fait que la profondeur d'ornière causée par les charges de trafic lourd est inversement proportionnelle à la viscosité de l'enrobé, élevée à une certaine puissance. Pour l'obtention de la relation mathématique finale, la viscosité de l'enrobé est supposée comme étant linéairement reliée à la viscosité du liant.

L'équation suivante, souvent utilisée pour modéliser l'orniérage, est utilisée comme point de départ.

$$h = \alpha \cdot N^\beta \quad (2.2)$$

avec h: profondeur d'ornière  
 N: nombre de passages d'essieux  
 $\alpha$  et  $\beta$ : coefficients expérimentaux

En considérant l'hypothèse principale, les auteurs arrivent à la relation:

$$h = d \cdot \left( \frac{N}{\eta_{ob}^k} \right)^\beta \quad (2.3)$$

où d et k sont des constantes  
 $\eta_{ob}$  est la viscosité du liant  
 $\beta$  varie avec la viscosité de l'enrobé.

Pour observer son degré de validité, l'équation obtenue a été vérifiée en utilisant des données existantes de simulation de trafic provenant d'essais en laboratoire et d'essais in situ. Pour cette vérification,  $\beta$  a été supposée constante. Il a été conclu dans cette étude que:

- la profondeur d'ornière diminue avec l'augmentation de la viscosité du liant
- l'enrobé et la viscosité du liant sont linéairement liés si les variables relatives au squelette minéral sont fixes
- les équations où le coefficient  $\beta$  est considéré comme variable sont plus précises que celles où il est considéré constant, car  $\beta$  change dans la plupart des cas. Cependant, la simple représentation de la profondeur d'ornière face à la viscosité du liant peut être très dispersée
- une viscosité élevée du liant joue un rôle important dans les performances à l'orniéage face à de petites variations de la teneur en vides, du type, de la taille et de la distribution des granulats
- la valeur du coefficient  $\beta$  est identique pour tous les enrobés modifiés aux polymères fabriqués à partir de la même base de liant, même si la viscosité change drastiquement avec l'addition de polymères. Seuls les liants purs de différentes catégories ont des valeurs différentes de  $\beta$ . Cependant, le comportement face à l'orniéage des bitumes purs n'est pas le même que celui des bitumes modifiés aux polymères.
- Un liant de base avec une viscosité moindre est plus approprié à la modification aux polymères si le but recherché est la résistance à l'orniéage

Pour les cas traités dans cette étude, la validité de l'équation de prédiction de l'orniéage est démontrée et la viscosité du liant semble être un paramètre critique en ce qui concerne l'orniéage.

## 2.2.4 An analytically Based Approach to Rutting Prediction [12] [16]

Il s'agit d'une étude décrivant les résultats d'une approche mécanico-empirique pour estimer l'évolution de l'orniérage des enrobés bitumineux en fonction de la charge de trafic et de l'environnement dans lequel se trouve la chaussée, tout en considérant la manière dont celui-ci agit sur la température de la chaussée.

Cette approche utilise des valeurs de déformations permanentes déterminées, pour un enrobé bitumineux représentatif, comme étant des fonctions du nombre de répétitions de charges, de la contrainte de cisaillement et de la déformation élastique de cisaillement. Elle combine une analyse élastique multicouche pour permettre l'extraction des contraintes et déformations de cisaillement déterminantes qui résultent des charges de trafic. Ces valeurs déterminantes sont utilisées dans l'expression des déformations permanentes, tout en tenant compte du processus de durcissement avec le temps de l'enrobé, dû à une accumulation de déformations permanentes dépendantes de la charge de trafic et de l'environnement de la chaussée.

Dans cette approche, deux hypothèses principales sont faites, à savoir que:

- la chaussée est supposée se comporter comme étant un système élastique multicouche
- l'orniérage est supposé comme étant lié aux les déformations de cisaillement

En considérant ces hypothèses, les valeurs calculées de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et de la déformation de cisaillement  $\gamma^e$ , à une profondeur de 50 mm sous le bord du pneu, sont utilisées pour estimer l'orniérage.

Dans une première estimation, la densification de l'enrobé bitumineux n'est pas prise en compte. Donc, pour un cas de charge simple, la déformation permanente de cisaillement dans l'enrobé a la forme suivante:

$$\gamma^i = a \cdot e^{b\tau} \cdot \gamma^e \cdot n^c \quad (2.4)$$

où  $\gamma^i$  est la déformation permanente (non élastique) de cisaillement

$\tau$  est la contrainte de cisaillement déterminée par analyse élastique

$\gamma^e$  est la déformation de cisaillement élastique correspondante

$n$  est le nombre de répétitions de charges

$a, b, c$  sont des coefficients de régression.

Le processus de durcissement avec le temps est utilisé pour estimer l'accumulation de déformations non élastiques dans l'enrobé bitumineux sous des conditions réelles. Les équations qui en résultent sont:

$$a_j = a \cdot e^{b\tau} \cdot \gamma_j^e \quad (2.5)$$

$$\gamma_j^i = a_1 \cdot [\Delta n_1]^c \quad (2.6)$$

$$\gamma_j^i = a \cdot \left[ \left( \frac{\gamma_{j-1}^i}{a_j} \right)^{\frac{1}{c}} + \Delta n_1 \right]^c \quad (2.7)$$

où  $j$  est la  $j^{\text{ème}}$  heure de passage du trafic

$\gamma_j^i$  est la déformation élastique de cisaillement à la  $j^{\text{ème}}$  heure

$\Delta n$  est le nombre de répétitions de charge appliquées durant la  $j^{\text{ème}}$  heure

La profondeur d'ornière  $rd$  (=rut depth) due à la déformation de cisaillement de la couche est déterminée par la relation

$$rd_{AC} = K \cdot \gamma_j^i \quad (2.8)$$

où  $K$  est un coefficient reliant la profondeur d'ornière à la déformation inélastique et dépendant de l'épaisseur de la couche.

La contribution des couches non liées est prise en compte par une relation du type  $rd=dn^e$  où  $d$  et  $e$  sont des coefficients déterminés expérimentalement. Les analyses par moindres carrés de certaines données du WesTrack suggèrent que la valeur de  $d$  est:

$$d = \frac{f}{\left[ 1,05 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_v^{-4,484} \right]^e} \quad (2.9)$$

avec  $f=3,548$

$e=0,372$

Ce procédé est basé sur des critères utilisés dans la procédure de dimensionnement des chaussées de l'Asphalt Institute et modifié par des données de performance du WesTrack.

Les exemples présentés utilisant la méthode de prédiction d'orniéage pour quatre différentes sections WesTrack et pour un certain éventail de températures, ont fourni des comparaisons raisonnables entre les ornières calculées et les ornières observées in situ.

## 2.2.5 Determining Pavement Layer Contributions to Rutting by Surface Profile Analysis [17]

Cette étude présente une méthode pour estimer la contribution relative des couches de la chaussée à l'orniéage total en partant d'une analyse de la planéité transversale de la couche de surface. L'étude est basée sur l'utilisation des données disponibles dans la littérature, sur une analyse théorique à l'aide d'un modèle d'éléments finis et sur des données d'orniéage relevées in situ.

Selon ses auteurs, l'analyse par éléments finis s'avère être un outil efficace pour représenter la géométrie des différentes couches de la chaussée, les caractéristiques des matériaux, les conditions aux limites et les conditions de charge. En effet, les déformations de surface résultant de l'application de ce modèle correspondent bien aux déformations de surface des chaussées soumises au trafic.

Les critères de déformation de surface figurant dans la littérature et identifiés par d'autres auteurs ayant mené des recherches similaires, ont été utilisés pour établir les facteurs importants dans l'analyse par

éléments finis de cette étude. Une matrice de sections de chaussée a été développée pour couvrir une certaine gamme de types et d'épaisseurs de couches.

Les critères de déformation se basent sur le calcul des surfaces qui résultent de la différence entre le profil transversal de la route à l'origine et le profil transversal final, orniéré. Ces surfaces sont positives quand elles forment des bourrelets, et négatives quand elles forment des creux. En première approximation, le rapport des surfaces positives et négatives permet de tester si l'origine de l'ornière provient principalement de la couche de surface ou de la couche de fondation. Ensuite, le rapport de la somme de ces surfaces avec le nombre de charges appliquées (nombre d'essieux) permet d'affiner ce résultat pour différencier les couches de surface et de base des couches de fondation et de base.

L'acceptation des critères de rupture dépend de leur précision et de leur simplicité. Les aires totales (déterminées à partir des profils transversaux) des mêmes modes de rupture varient avec l'épaisseur des couches. Cependant, l'épaisseur des différentes couches n'est pas un critère considéré parce que, d'une part, l'épaisseur réelle des couches n'est souvent pas connue et il est certaines fois très difficile d'obtenir des approximations et, d'autre part, les chaussées peuvent avoir différentes combinaisons de couches et d'épaisseurs de couches, ce qui rend impossible le développement de critères simples. Donc, l'approche utilisée pour le développement des critères a été que, pour chaque critère de rupture où chaque couche est considérée comme endommagée et en traçant des droites de régression sur les points d'un graphe représentant la profondeur d'ornière et l'aire totale (à partir du profil transversal), la limite entre chaque rupture de couche est considérée comme étant la ligne médiane passant au milieu de deux droites de régression (représentant chacune la rupture de deux couches différentes).

Les critères proposés pour prévoir quelle couche sera endommagée à partir du profil transversal de la surface de la chaussée sont indépendants du matériau en place. Cependant, l'identification d'une couche comme endommagée permet de mettre en évidence d'éventuels défauts dans les matériaux, les caractéristiques, la construction ou le dimensionnement. L'application des critères proposés sur un profil transversal permet donc l'identification de la couche qui contribue le plus à l'orniérage.

## 2.2.6 Development of a pavement rutting model from experimental data [5]

Cette étude présente le développement d'un modèle non linéaire d'orniérage des chaussées à partir de l'essai de simulation de trafic AASHO. La spécification du modèle utilise des concepts connus comme les équivalences de charges et les coefficients structurels.

$$RD_{it} = \beta_{10} + \sum_{s=1}^t a_i \cdot e^{\beta_8 \frac{TI_s}{1000}} \cdot \beta_9 \cdot \frac{\Delta N_{is}}{N_{is}^{1-\beta_9}} + u_i + \varepsilon_{it} \quad (2.10)$$

avec  $RD_{it}$  : profondeur d'ornière de la section  $i$  au temps  $t$  [mm]

$\beta_{10}$ : profondeur d'ornière immédiatement après la construction de la chaussée

$a_i$ : profondeur d'ornière causée par le passage du premier essieu équivalent

$\beta_8$ : coefficient lié à l'indice de gel

$\beta_9$ : coefficient lié à la charge de trafic

$TI$ : indice de gel

$N_{is}$ : nombre de répétitions de charge appliquées à la section  $i$  pendant le temps  $s$



- $u_i$ : perturbation aléatoire caractérisant la  $i^{\text{ème}}$  section et constante dans le temps (moyenne=0, variance=Cte).
- $\epsilon_{it}$ : erreur dont la moyenne est 0 et la variance est constante

Selon ses auteurs, cette méthode est une amélioration d'autres formules empiriques déjà existantes pour plusieurs raisons:

- Les paramètres d'équivalence de charge et de résistance ont été admis variables contrairement à d'autres recherches empiriques antérieures où ces coefficients ont été fixés, ce qui explique peut-être leur manque de succès.
- L'autre apport important est l'introduction d'un indice de gel. Cette variable semble être extrêmement importante pour prendre en compte l'effet de l'environnement dans l'essai de simulation de trafic AASHO.

Le modèle non linéaire s'ajuste bien si l'on considère le nombre de sections utilisées pour son estimation. Pourtant, il présente quelques limitations:

- Le modèle est limité à des matériaux utilisés dans l'essai de simulation de trafic AASHO. Plusieurs facteurs influençant l'orniérage des enrobés bitumineux, comme la teneur en liant, ne sont pas pris en compte.
- Le modèle ne peut pas prendre en compte l'orniérage des chaussées dû à l'instabilité des enrobés bitumineux dans des environnements à hautes températures.
- Les données expérimentales ne représentent pas le mécanisme de détérioration réel des chaussées en service, à cause des différences dans des facteurs comme la répartition ou la vitesse du trafic ou encore le vieillissement du matériau.

### **2.2.7 Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer [26]**

Cette étude présente une méthode totalement empirique de prédiction des ornières basée sur les résultats d'un essai d'orniérage largement utilisé aux Etats-Unis: l'"Asphalt Pavement Analyzer" (APA). Cet essai peut être mené sur des éprouvettes prismatiques ou cylindriques. Pour évaluer l'APA et déterminer sa validité en tant que méthode générale de prédiction d'ornières, plusieurs matériaux ont été statistiquement choisis, de telle manière à représenter un certain éventail de matériaux et de conditions climatiques.

Les auteurs présentent une série de graphiques illustrant des corrélations entre les ornières mesurées in situ et les profondeurs d'ornières obtenues à l'essai d'orniérage APA. Ces corrélations sont très variables suivant les cas et les matériaux considérés. Les principales conclusions sont les suivantes:

- Les éprouvettes cylindriques et prismatiques utilisées dans l'APA prédisent suffisamment bien et de manière très similaire l'orniérage in situ. Cependant, les profondeurs d'ornières sont plus importantes sur les éprouvettes prismatiques que sur les éprouvettes cylindriques.
- Les résultats de l'APA obtenus sur les éprouvettes cylindriques compactées à 4% de vides et les éprouvettes prismatiques compactées à 5% de vides ont donné des résultats plus proches de l'orniérage in situ que les éprouvettes (cylindriques et prismatiques) compactées à 7% de vides.

- La température d'essai affecte significativement les profondeurs d'ornières obtenues avec l'APA. Plus la température d'essai augmente et plus la profondeur d'ornière augmente.

### **2.2.8 Contribution des mesures rhéologiques sur liants à la prévision de l'orniérage en laboratoire [24]**

Cette étude présente une méthode empirique de prévision de l'orniérage en fonction des propriétés rhéologiques des liants qui composent les enrobés bitumineux. En effet, pour une même formulation, le comportement de l'enrobé en place est fortement dépendant de celui du liant.

Les propriétés étudiées pour les sept liants choisis ont été les suivantes:

- Pénétration à 25°C
- Température de ramollissement anneau et bille
- Indice de pénétration
- Viscosité dynamique à 60°C sur un viscosimètre cône-plan avant et après l'essai de vieillissement RTFOT
- Indice d'instabilité colloïdale à partir des constitutions chimiques obtenues par la méthode CLPH (Chromatographie Liquide Haute Performance)

Les graphiques présentés montrent les corrélations obtenues entre la profondeur d'ornière et chaque paramètre précité. Il ressort de toutes ces corrélations que, pour des bitumes purs:

- Les températures de ramollissement anneau et bille, les viscosités à 60°C et les modules complexes mesurés après vieillissement RTFOT constituent un bon moyen d'estimation de la résistance d'un enrobé face à l'orniérage
- La résistance à l'orniérage augmente si la température de ramollissement anneau et bille, la viscosité à 60°C et le module sont élevés et si l'angle de phase est faible.

Pour les bitumes modifiés, la température de ramollissement anneau et bille et la viscosité à 60°C ne paraissent pas être des critères fiables contrairement au module complexe. Il semblerait que la corrélation entre le module complexe et l'orniérage peut être améliorée en effectuant des essais à plus basse fréquence.

### **2.2.9 Recommended Performance-Related Specification for Hot-Mix Asphalt Construction: Results of the WesTrack Project [16]**

Une partie de ce rapport a été consacré au développement de modèles capables de définir l'influence du pourcentage de liant, du pourcentage de vides et de la granulométrie sur l'accumulation des déformations permanentes dans les couches d'enrobés bitumineux. Les données utilisées ont été extraites de la base de données WesTrack et peuvent être résumées comme suit:

- Mesures des profondeurs d'ornières et du trafic associé exprimé en essieux équivalents [ESAL]

- Données issues de l'essai de cisaillement simple à hauteur constante (RSST-CH) mené sur des éprouvettes fabriquées et compactées in situ, avant et après le passage de tous les cycles de charge
- Données issues du RSST-CH (essai RILEM engagé et dirigé par M. Partl) mené sur des éprouvettes fabriquées et compactées en laboratoire

Deux approches, basées sur la régression, ont été proposées pour développer une relation entre la profondeur d'ornièrage et la charge de trafic, l'environnement et les variables de l'enrobé (teneur en liant, teneur en vides, granulométrie). Bien que les deux méthodes soient différentes, elles sont basées sur une équation commune:

$$\ln(rd) = a_0 + a_1 \cdot P_{asp} + a_2 \cdot V_{air} + a_3 \cdot P_{asp}^2 + a_4 \cdot V_{air}^2 + a_5 \cdot P_{200} + a_6 \cdot fa + a_7 \cdot \ln(ESAL) + a_8 \cdot T + \dots + (\text{variables représentant la granulométrie, le type de granulats, le type de section}) \quad (2.11)$$

avec rd: profondeur d'ornièrage [mm]

ESAL: nombre d'essieux équivalents de 80 kN

$P_{200}$ : pourcentage de granulats plus fins que 0.075 mm

fa: pourcentage de granulats passant par le tamis de 2.36 mm et retenus dans celui de 0.075 mm

$a_0 \dots a_n$ : constantes de régression

La première approche implique une régression directe entre la profondeur d'ornièrage et le trafic, l'environnement, ainsi que les paramètres liés à l'enrobé. Pour les enrobés à gros grains, l'équation précédente devient:

$$\ln(rd) = -4,939 + 0,212 \cdot \ln(ESAL) + 0,439 \cdot P_{asp} + 0,044 \cdot V_{air} + 0,034 \cdot T \quad (R^2 = 0,80) \quad (2.12)$$

où T est la température de l'air pendant la période d'étude et observée dans 90% des cas.

Pour les enrobés à grains fins, elle devient:

$$\ln(rd) = -5,257 + 0,357 \cdot \ln(ESAL) + 0,185 \cdot P_{asp} + 0,041 \cdot V_{air} + 0,916 \cdot P_{200} + 0,005 \cdot T \quad (R^2 = 0,67) \quad (2.13)$$

La seconde approche mentionnée utilise un modèle mécanico-empirique qui développe davantage l'équation précédente. La méthode est la même que celle décrite dans le chapitre 2.2.4 [12].

## 2.2.10 Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior [1]

Cette étude part du principe que les caractéristiques de la courbe de densification obtenue pendant le compactage giratoire de l'enrobé bitumineux sont liées à la résistance du squelette minéral. La résistance du squelette minéral peut donner une indication sur la résistance de l'enrobé bitumineux et par conséquent sur les performances attendues.

La presse à cisaillement giratoire applique des conditions constantes de pression verticale (600 kPa), d'angle de giration (1.25 deg) et de vitesse de rotation (30 rpm) sur l'enrobé bitumineux durant le procédé de compactage. Ces conditions transmettent à l'enrobé des contraintes de cisaillement constantes,

indépendamment de la rigidité du matériau. L'énergie transmise à l'éprouvette n'est pas constante mais augmente avec la rigidité de l'enrobé pour permettre aux efforts de cisaillement de créer le compactage. Ainsi, le taux de compactage semble être très lié aux caractéristiques des granulats, de même que la granulométrie, la forme et la texture. La pente de la courbe de compactage est calculée comme suit:

$$k = 100 \cdot \frac{C_{des} - C_{ini}}{\log(N_{des}) - \log(N_{ini})} \quad (2.14)$$

où  $k$  est la pente de la courbe de compactage (compaction slope) et  $C_{des}$  et  $C_{ini}$  sont les niveaux de compactage correspondant respectivement au nombre de girations de dimensionnement  $N_{des}$  et au nombre de girations initial  $N_{ini}$ .

Les données acquises indiquent que la pente de compactage est indépendante de la rigidité ou de la résistance à l'orniérage de l'enrobé, du fait qu'elle est insensible aux changements de la teneur en liant. Pourtant, il semble que le produit de la pente de compactage et de la teneur en vides soit sensible au changement de la teneur en liant.

Malgré les limitations de cette méthode dues à la faible capacité de différenciation parmi les rigidités des différents liants, le nombre de girations correspondant à la contrainte de cisaillement maximale  $N-SR_{max}$  apparaît comme étant un paramètre lié à la rigidité du matériau et à la résistance à l'orniérage. Selon ses auteurs, la valeur  $N-SR_{max}$  devrait servir d'indicateur préliminaire de l'instabilité du matériau sans qu'un essai mécanique de performance soit nécessaire.

### 2.2.11 Estimating the Rutting Potential of Asphalt Mixtures using Superpave Gyrotory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength [2]

Cette étude examine la possibilité d'utiliser la résistance déterminée à l'aide l'essai de traction indirecte et les résultats de la presse à cisaillement giratoire pour prédire le potentiel d'orniérage d'un enrobé bitumineux tout en utilisant la théorie de rupture de Mohr-Coulomb.

L'hypothèse de base est que le comportement à l'orniérage d'un enrobé bitumineux suit la théorie de rupture de Mohr-Coulomb et que les composants de cette théorie, l'angle de frottement interne  $\phi$  et la cohésion  $c$ , sont respectivement liés aux paramètres de la presse à cisaillement giratoire et de l'essai de traction indirecte. Cette hypothèse se base sur les résultats de deux études. La première [1] a exploré la possibilité d'utiliser les paramètres donnés pendant le compactage dans la presse à cisaillement giratoire pour estimer le potentiel d'orniérage d'un enrobé bitumineux. La deuxième a mis en évidence une relation entre la résistance à la traction indirecte et la théorie de rupture de Mohr-Coulomb.

En utilisant la résistance à la traction indirecte, le pourcentage de vides du squelette minéral et la pente de la courbe de compactage comme variables de prédiction, le modèle suivant a été obtenu:

$$RD = -0,0337 \cdot S_t + 4,37 \cdot VMA + 5,37 \cdot k - 0,377 \cdot VMA \cdot k \quad (2.15)$$

avec RD: profondeur d'ornière issue de l'essai de cisaillement répété à hauteur constante [mm]

$S_t$ : résistance à l'essai de traction indirecte [kPa]

VMA: teneur en vides du squelette minéral [%]

$k$ : pente de compactage issue de la presse à cisaillement giratoire

D'après les auteurs, le modèle fournit de bonnes corrélations ( $R^2=0.82$ ) entre les paramètres considérés et le potentiel d'orniérage. De ce fait, il peut être utilisé pour modéliser rapidement le potentiel d'orniérage d'une chaussée tant au niveau du dimensionnement que du contrôle de qualité in situ.

### **2.2.12 Development of a Simple Method for the Prediction of Permanent Deformation of Asphalt in the Field [27]**

Cet article présente une méthode simplifiée d'évaluation (Simplified Rut Evaluation Method) pour la prédiction des déformations permanentes des chaussées pour de faibles charges de trafic. La méthode fournit un indicateur d'orniérage calculé à partir d'une série de données, ayant chacune différents poids basés sur le jugement de l'ingénieur. Comme la cohésion et l'angle de frottement interne d'un enrobé bitumineux sont des facteurs qui contribuent à la résistance de l'enrobé face à l'orniérage, ces paramètres ont un poids positif. Les poids correspondant à la charge de trafic et à la température sont négatifs, du fait que ce sont des éléments externes à l'enrobé qui contribuent à augmenter l'orniérage.

L'hypothèse de base de cette méthode est que la relation entre les paramètres individuels d'essai et le potentiel d'orniérage est non linéaire et qu'il existe une zone au-delà de laquelle le potentiel d'orniérage augmente considérablement.

Pour surmonter les problèmes liés à l'obtention de données, l'approche adoptée consiste à estimer des valeurs limites (par exemple des valeurs au-delà desquelles le potentiel d'orniérage est supposé augmenter significativement) sur la base des connaissances acquises et d'une analyse statistique des résultats d'essai observés.

Une fois que la valeur limite pour un paramètre particulier est connue, on essaie de définir une échelle d'appréciation allant de "faible" à "très bon". Les paramètres pris en compte considèrent trois aspects:

1. Aspects en relation avec la force cohésive:
  - Viscosité à 60°C:
    - fournit une mesure fondamentale de la résistance du liant face aux contraintes de cisaillement
  - Point de ramollissement anneau et bille:
    - fournit une indication sur la température à laquelle un changement de phase intervient aussi bien dans le liant que dans le mastic
  - Résistance à la traction indirecte:
    - fournit une indication sur la résistance à la traction de la combinaison granulats-mastic
2. Aspects en relation avec la résistance au frottement:
  - Teneur en vides (ou pourcentage de vides remplis par le liant):
    - Ces valeurs ont une grande influence sur le potentiel d'orniérage d'une chaussée. Des valeurs limites sont proposées, à savoir 4% de teneur en vides minimale et 70% au maximum de pourcentage de vides remplis par le liant
  - Essai de fluage dynamique ou essai d'orniérage:

- Malgré le grand éventail d'essais de ce type, l'essai d'orniérage est considéré comme étant plus précis que beaucoup d'autres essais

### 3. Aspects en relation avec l'environnement:

- Température:
  - La relation entre la température et le potentiel d'orniérage est complexe et fortement dépendant du type d'enrobé et du niveau de contraintes. Les auteurs ont défini différentes zones en fonction de la durée d'ensoleillement et de la température
- Charge journalière de trafic lourd
  - Au même titre que la température, la charge journalière de trafic lourd est déterminante quant à l'agressivité de l'environnement dans lequel se trouve la chaussée. Les auteurs ont défini une classification du trafic en fonction de la charge de trafic lourd
- Intensité de la charge de trafic
  - La classification du trafic est basée sur les conditions typiques de dimensionnement. Elle doit être ajustée si l'intensité de charge est susceptible d'être augmentée par des facteurs exceptionnels tels qu'un pourcentage élevé de véhicules lourds anormalement surchargés ou un taux d'augmentation du trafic de plus de 10%.

D'après les auteurs, la méthode paraît robuste et assez sensible pour détecter les changements dans les propriétés de l'enrobé ou de l'environnement et donner des renseignements sur les problèmes qui risquent d'apparaître in situ. Le modèle est également adaptable au fur et à mesure que de nouvelles connaissances sont acquises sur le phénomène d'orniérage.

#### 2.2.13 Performance analysis of road infrastructure (PARIS) [39]

L'objectif de ce projet a été de développer des modèles européens de performance des chaussées qui puissent être utilisés dans le cadre de la gestion d'entretien. Diverses données sur l'état des chaussées ont été recueillies dans les quinze pays participant au projet, puis stockées dans une base de données centrale pour ensuite être analysées et permettre d'établir les modèles.

La propagation de l'orniérage a été modélisée en prenant en compte des essieux équivalents (ESAL) d'une charge de 100 kN et en considérant l'âge de la chaussée depuis les derniers travaux de maintenance effectués ou depuis sa construction. 371 sections de chaussées avaient des valeurs sur l'orniérage disponibles sur la base de données. L'analyse des essais accélérés en vraie grandeur (ALT "Accelerated Loading Testing") a montré que la propagation de l'orniérage était linéaire, c'est pourquoi le choix s'est porté sur un type de modèle linéaire. Des deux modèles qui sont présentés, l'un a la profondeur d'ornière en mm en ordonnée, et le nombre d'essieux équivalents comptabilisés depuis les derniers travaux de réparation ou depuis sa construction. Des équations sont données pour chaque type de chaussée, flexibles, semi-rigides ou tous types de chaussées confondus:

$$\text{Chaussées flexibles:} \quad \log(RD_{\text{ESAL}}) = 0,05 + 0,93 \cdot \log\left(\frac{RD_{\text{last}}}{\text{MESAL}_{\text{last}}}\right) \quad (2.16)$$

$$\text{Chaussées semi-rigides: } \log(RD_{\text{ESAL}}) = 0,02 + 0,86 \cdot \log\left(\frac{RD_{\text{last}}}{\text{MESAL}_{\text{last}}}\right) \quad (2.17)$$

$$\text{Toutes les chaussées: } \log(RD_{\text{ESAL}}) = 0,04 + 0,90 \cdot \log\left(\frac{RD_{\text{last}}}{\text{MESAL}_{\text{last}}}\right) \quad (2.18)$$

avec  $RD_{\text{ESAL}}$ : profondeur d'ornière en fonction de la charge de trafic [mm]

$RD_{\text{last}}$ : profondeur d'ornière à la dernière mesure [mm]

$\text{MESAL}_{\text{last}}$ : millions d'essieux équivalents à la dernière mesure depuis la construction ou les derniers travaux de réparation

L'autre modèle présente la profondeur d'ornière en ordonnée et l'âge de la chaussée en abscisse:

$$\text{Chaussées flexibles: } RD_{\text{age}} = -0,02 + 1,05 \cdot \frac{RD_{\text{last}}}{\text{age}_{\text{last}}} \quad (2.19)$$

$$\text{Chaussées semi-rigides: } RD_{\text{age}} = -0,18 + 1,16 \cdot \frac{RD_{\text{last}}}{\text{age}_{\text{last}}} \quad (2.20)$$

$$\text{Toutes les chaussées: } RD_{\text{age}} = -0,07 + 1,09 \cdot \frac{RD_{\text{last}}}{\text{age}_{\text{last}}} \quad (2.21)$$

avec  $RD_{\text{age}}$ : profondeur d'ornière en fonction de l'âge de la chaussée [mm]

$RD_{\text{last}}$ : profondeur d'ornière à la dernière mesure [mm]

$\text{age}_{\text{last}}$ : âge du revêtement à la dernière mesure depuis la construction ou les derniers travaux de réparation

Les principales conclusions en ce qui concerne l'orniérage sont que:

- Pour la gamme d'orniérage considérée dans la pratique de la gestion de la maintenance, un modèle linéaire est parfaitement approprié.
- Pour n'importe quelle section de route donnée et à l'aide des équations ci-dessus, l'orniérage peut être estimé à partir de la profondeur d'ornière mesurée à la dernière inspection et le nombre d'essieux équivalents supportés par la chaussée ou son âge.
- Si l'on dispose de suffisamment de données d'orniérage pour une section de chaussée considérée, le modèle linéaire peut être dérivé directement de ces données pour obtenir un modèle propre à cette section.
- L'orniérage des chaussées flexibles et semi-rigides est similaire, ce qui implique que les ornières se développent dans les couches de surface et que l'orniérage structurel n'a pas été observé.

### 2.2.14 Méthode belge [19]

Une méthode de prédiction de la profondeur d'ornière a été développée au centre de recherches routières (CRR) par Louis Francken et est largement utilisée en Belgique. Cette loi est issue de l'analyse des résultats d'un grand nombre d'essais triaxiaux dynamiques et donne une déformation plastique en fonction du nombre de cycles de charge appliqués:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2 \cdot E_p(V, T)} \cdot \left[ \frac{N}{450 \cdot V} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.22)$$

avec  $\varepsilon_p$ : déformation permanente

$V$ : vitesse du véhicule [km/h]

$T$ : température [°C]

$N$ : nombre de cycles de charge

$E_p$ : module de déformation permanente dépendant de la vitesse et de la température

$\sigma_h$  et  $\sigma_v$ : contraintes horizontales et verticales sous l'effet des charges

Il est possible de transformer la déformation permanente de chaque couche  $i$  en un déplacement de surface total par la formule suivante:

$$u_{perm} = \sum_i h_i \cdot \varepsilon_{pi} \quad (2.23)$$

avec  $u_{perm}$ : déplacement permanent en surface [mm]

$h_i$ : épaisseur de la couche  $i$  [mm]

$\varepsilon_i$ : déformation permanente de la couche  $i$

Dans cette méthode, la prédiction de la profondeur d'ornière est liée au nombre de charges appliquées sans tenir compte des variations de l'intensité des charges de trafic.



### 3 Etude expérimentale

#### 3.1 Choix des sites et des matériaux à tester

Pour être en mesure de réaliser l'inventaire des chaussées et obtenir un échantillonnage représentatif traduisant l'étendue des sollicitations climatiques ainsi que les spécificités du trafic poids lourd, la collaboration des différentes administrations cantonales suisses a été sollicitée. Une demande et un questionnaire leur ont été adressés afin d'obtenir des renseignements sur l'existence éventuelle de chaussées présentant les caractéristiques suivantes:

- Profondeur d'ornièrerie supérieure à 10 mm
- Durée de mise en service de la chaussée entre 5 et 15 ans
- Prélèvement et essai sur le liant effectués à la mise en œuvre
- Prélèvement et essai sur l'enrobé effectués à la mise en œuvre
- Teneur en vides résiduels à la mise en œuvre inférieure à 7%

Afin de limiter l'impact causé par les prélèvements d'échantillons de chaussée, il a été jugé plus judicieux de se limiter à l'extraction d'échantillons sur des chaussées pour lesquelles l'administration avait déjà planifié des travaux de maintenance.

Le questionnaire envoyé aux administrations cantonales se présentait sous la forme suivante:

<u>Désignation de la route :</u>	
Canton : .....	du km : ..... au km : .....
Altitude :	<input type="checkbox"/> < 500 m <input type="checkbox"/> 500 < 800 m <input type="checkbox"/> 800 < 1200 m <input type="checkbox"/> > 1200 m
<u>Caractéristique de la couche de roulement :</u>	
Type et sorte de couche de surface :	.....
Classe de bitume :	.....
Teneur en vides :	.....
Caractéristique de la fondation :	<input type="checkbox"/> grave <input type="checkbox"/> stabilisation
Estimation de l'ornièrerie actuelle :	<input type="checkbox"/> 1...3 cm <input type="checkbox"/> > 3 cm

Figure 2: Forme du questionnaire envoyé aux administrations cantonales

Grâce aux indications qui sont parvenues de plusieurs administrations cantonales, il a été possible de dresser un éventail de chaussées satisfaisant les caractéristiques mentionnées dans le questionnaire. Ainsi, les sites répertoriés dans le Tableau 1 ont servi de base d'étude.

Site	Altitude du site	Type d'enrobé de surface	Classe de bitume	Teneur en vides	Type de fondation	Estimation de l'ornière
FR – Kleingurmels	500 – 800 m	AB 10 N-	B80/100	-	-	-
FR – Montbovon	500 – 800 m	AB 10 N	B80/100	-	-	-
GR – Davos	> 1200 m	AB 11 N	PmB Styrelf 13/150	3%	grave	1...3 cm
GR – Grüşch	500 – 800 m	AB 16 N	B80/100 avec Trinidad	3,3%	grave	1...3 cm
GR – S-chanf	> 1200 m	AB 10	PmB-	4,1%	-	1...3 cm
JU – Delémont	< 500 m	-	-	-	grave	> 3 cm
JU – St-Brais	800 – 1200 m	-	-	-	grave	1...3 cm
VD – Lonay	< 500 m	AB 16	-	-	-	-
VS – Bovernier	500 – 800 m	AB 10	-	-	grave	> 3 cm
VS – Monthey	< 500 m	AB 10 N	-	-	grave	> 3 cm
ZH – Bertschikon	< 500 m	AB 11	-	3,5%	stabilisation	-

Tableau 1: Informations transmises par les cantons

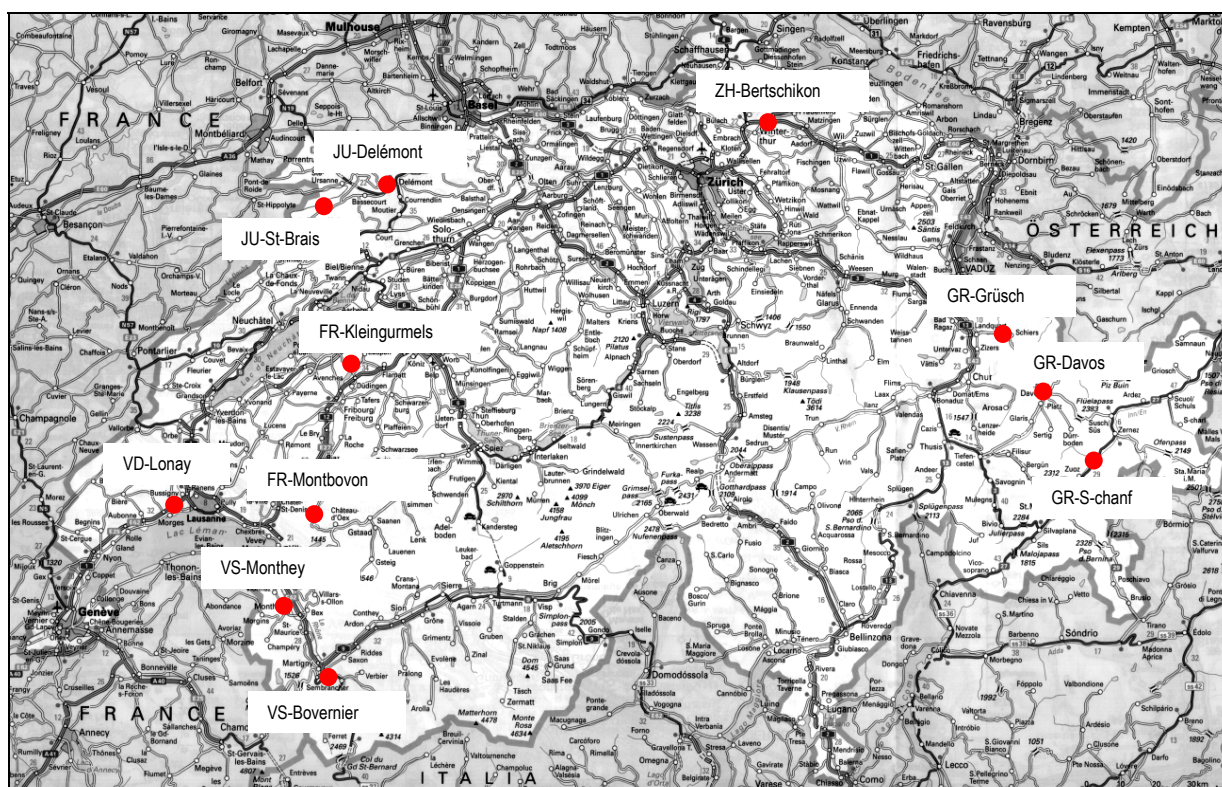


Figure 3: Localisation des sites retenus

### 3.2 Mesure de la planéité transversale

Pour connaître la profondeur effective des ornières sur chaque site, la mesure de la planéité transversale a été effectuée selon la norme SN 640 520a [36]. Elle a été réalisée en utilisant un transverso-profilographe sur certains sites et en effectuant un relevé de niveaux sur d'autres. La méthode de mesure consiste à

poser perpendiculairement au sens de circulation de la route une latte d'une longueur de 4 m et de relever deux valeurs caractéristiques pour apprécier la planéité transversale (Figure 4):

- Valeur T: représente la profondeur des ornières par rapport à la droite qui relie les points les plus élevés compris dans une longueur de 4 m.
- Valeur t: représente la profondeur des ornières par rapport à l'horizontale et par conséquent la hauteur d'eau théorique qui peut s'accumuler en surface.

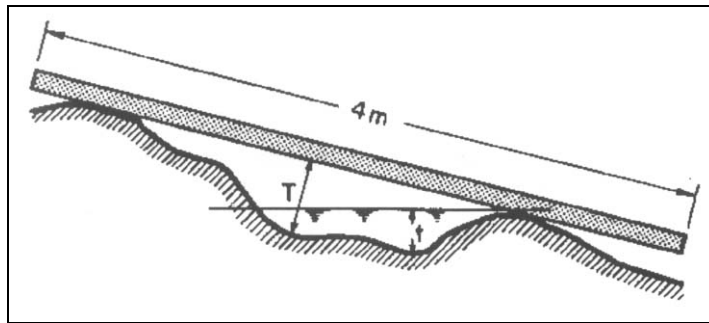


Figure 4: Mesure de la planéité transversale [36]

Pour la grande majorité des sites, trois relevés de la planéité transversale ont été effectués, sauf pour Bovernier et Monthey où il n'y en a eu que deux. Les distances séparant chaque mesure oscillent entre 0,5m. et 5m. On peut apprécier en annexe 10.1 les images numérisées de ces relevés ainsi que les valeurs de l'ornière T et de la hauteur d'eau t. Dans le Tableau 2 figurent les profondeurs moyennes des ornières en place calculées à partir des différentes mesures.

MESURES RELEVÉES IN SITU						VALEURS MOYENNES		
Site	Abscisse [m]	Profondeur d'ornière [mm]		Hauteur d'eau [mm]		T_gauche [mm]	T_droite [mm]	Tmoy [mm]
		T_gauche	T_droite	t_gauche	t_droite			
FR_Kleingurmels	-1.5	12	12	2	6	11.0	11.0	11.0
	0	11	10	5	4			
	1.5	10	11	4	3			
FR_Montbovon	-1.5	4	6	2	5	4.0	6.3	5.2
	0	4	7	0	4			
	1.5	4	6	0	3			
GR_Davos	-1.5	16	8	3	1	16.7	7.0	11.8
	0	17	7	2	0			
	1.5	17	6	2	0			
GR_Grüsich	-1.5	7	4	0	0	7.7	4.0	5.8
	0	8	4	1	0			
	1.5	8	4	1	0			
GR_S-chanf	-1.5	7	7	0	0	7.7	7.0	7.3
	0	7	7	0	0			
	1.5	9	7	1	0			
JU_Delémont	-1.5	34	26	6	8	34.0	27.7	30.8
	0	34	30	7	17			
	1.5	34	27	5	9			
JU_St-Brais	-1.5	6	16	6	10	4.7	17.3	11.0
	0	3	16	0	11			
	1.5	5	20	3	17			
VD_Lonay	-1.5	4	8	0	0	4.0	7.0	5.5
	0	4	6	0	0			
	1.5	4	7	0	0			
VS_Bovernier	-2	8	21	0	16	8.0	17.0	12.5
	2	8	13	3	12			
VS_Monthey	-0.5	15	35	0	0	17.5	32.5	25.0
	0.5	20	30	0	0			
ZH_Bertschikon	-5	11	10	1	3	10.0	10.7	10.3
	0	10	11	2	4			
	5	9	11	1	4			

Tableau 2: Valeurs des ornières en place

### 3.3 Prélèvement des plaques

Une fois tous les sites répertoriés et choisis, les prélèvements des matériaux à tester ont été effectués juste avant le début des travaux de maintenance prévus par l'administration cantonale. L'extraction des plaques a été menée à bien par les mêmes entreprises qui, par la suite, se sont occupées des travaux de réfection des chaussées.

Dans le Tableau 3 sont référencées les localisations des sites choisis, ainsi que les dates de pose de la couche de surface et de prélèvement de la plaque d'essai:

Site	Date pose du revêtement	Date prélèvement des échantillons	Date prélèvement des échantillons	Altitude des échantillons prélevés
FR – Kleingurmels	1977	Juin 2000	23 ans	558 m
FR – Montbovon	1988	Septembre 2000	12 ans	800 m
GR – Davos	1992	Juillet 2000	8 ans	1550 m
GR – Grüşch	1987	Juillet 2000	13 ans	600 m
GR – S-chanf	1986	Juillet 2000	14 ans	1670 m
JU – Delémont	1980	Mai 2000	20 ans	420 m
JU – St-Brais	1982	Mai 2000	18 ans	1000 m
VD – Lonay	1981	Août 1999	18 ans	395 m
VS – Bovernier	1984	Décembre 1999	15 ans	600 m
VS – Monthey	1985	Décembre 1999	14 ans	490 m
ZH – Bertschikon	1984	Juillet 1999	15 ans	500 m

Tableau 3: Données concernant les échantillons prélevés

Pour être en mesure de comparer les résultats issus des essais d'orniérage avec la profondeur des ornières existantes, il a été nécessaire de pouvoir disposer d'un matériau peu sollicité qui n'ait pas subi trop de dommages dus au trafic. Les échantillons destinés à l'essai d'orniérage ont donc été prélevés dans la partie située entre chaque bande de roulement, c'est à dire là où il n'y a pas d'ornières.

Dans une première étape, les plaques d'essai ont été prélevées en groupe de neuf plaques juxtaposées et groupées par trois, de 60 cm de long et de 30 cm de large (Figure 5).

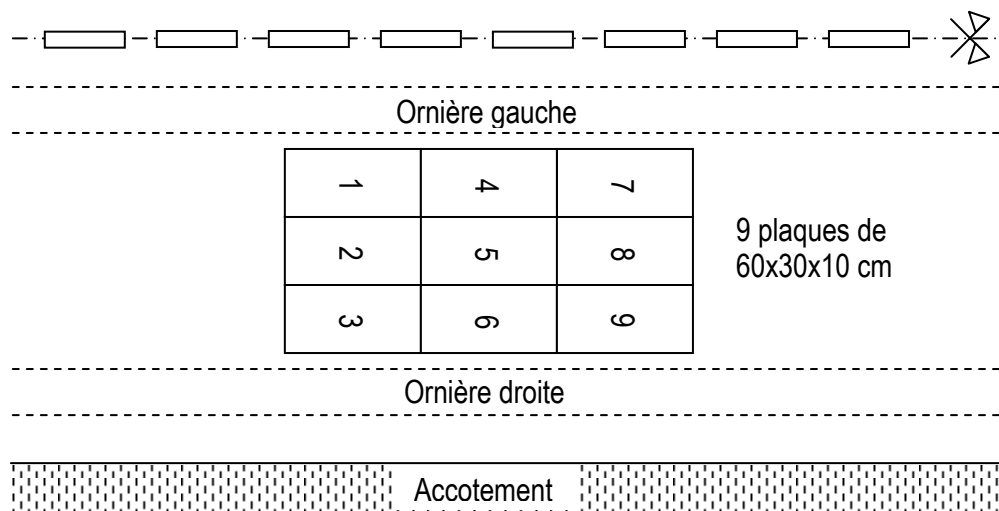


Figure 5: Premier plan de prélèvement des planches d'essai

Cependant, comme certains problèmes sont apparus lors de la réalisation des premiers essais d'orniérage, et afin de réduire les risques de prélever des matériaux sur les zones orniérées et faciliter l'exécution de l'essai d'orniérage, le mode de prélèvement des plaques a été modifié par la suite de telle sorte à prélever un groupe de huit plaques juxtaposées et groupées par deux, de 60 cm de long et 40 cm de large (Figure 6).

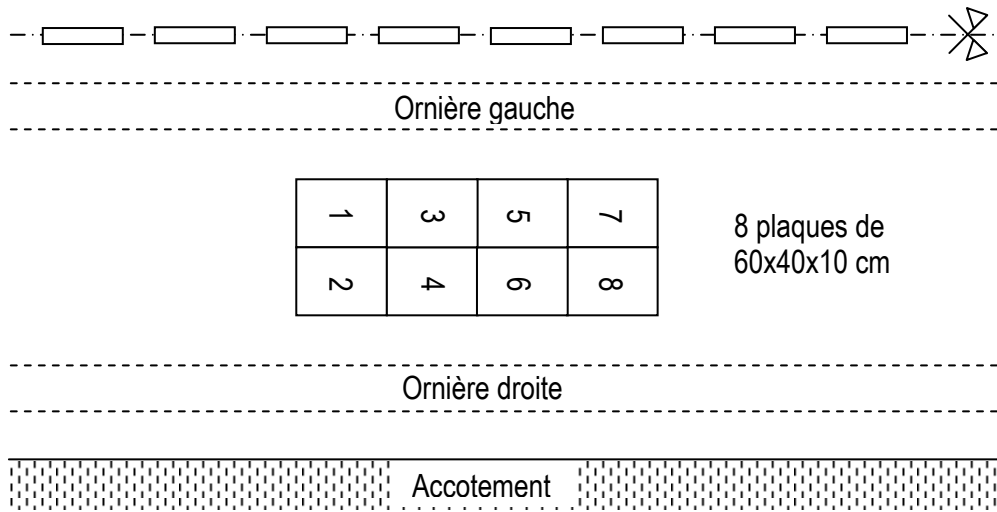


Figure 6: Second plan de prélèvement des plaques d'essai

### 3.4 Analyse des matériaux prélevés

La majeure partie des plaques prélevées étaient composées de deux couches. Une couche de roulement (AB) d'une épaisseur de 2,5 à 6 cm et une couche de base (HMT) d'une épaisseur de 6 à 9 cm. Comme l'éprouvette testée dans l'essai d'orniérage selon [28] est supposée homogène et mesure 10 cm d'épaisseur, la plus grande partie des essais effectués s'est fait sur des plaques composées de deux couches et par conséquent hétérogènes. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, les analyses des différents composants ont été faites sur les deux couches (AB et HMT).

#### 3.4.1 Granulométrie

La granulométrie de chaque couche provenant d'une même plaque de matériau prélevé a été analysée suivant la norme [37] puis chaque courbe granulométrique a été reportée en annexe 10.2.

Les valeurs numériques apparaissent dans le Tableau 4. On remarque que la taille maximale des granulats de la couche inférieure varie entre 11.2 mm et 31.5 mm et celle de la couche supérieure varie entre 11.2 mm et 22.4 mm (Tableau 5).

Site	Couche	Tamis [mm]													
		0.09	0.125	0.25	0.5	1	2	2.8	4	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5
FR-Kleingurmels	Inf.	9.5	10.7	13.5	17.1	22.4	32.3	39.7	49.2	62.7	91.7	100	100	100	100
	Sup.	10.4	12	15.9	22.1	30.5	44.5	53.9	61.9	73.6	94.9	99.3	99.8	100	100
FR-Montbovon	Inf.	9.7	10.8	13.5	17.8	23.7	31.1	35.6	40.0	45.0	52.4	62.6	82	99.5	100
	Sup.	8.7	10.3	14.7	21.6	31.9	47.7	56.7	63.3	75.5	93.9	100	100	100	100
GR-Davos	Inf.	6.7	7.4	9.3	13.6	24.8	33.4	37.3	41.8	50.5	61	71.5	83.3	100	100
	Sup.	11.6	13.3	17.0	22.3	30.7	46.4	58.0	68.2	78.6	89.8	99.1	100	100	100
GR-Grüsch	Inf.	8.3	9.4	12.0	16.3	22.7	33.6	41.4	47.1	51.9	66.8	84	99.6	100	100
	Sup.	9	10.2	12.5	15.9	21.0	29.6	35.6	40.9	46.9	56.6	66.5	84.2	100	100
GR-S-chanf	Inf.	8	9.7	13.7	19.2	26.6	36.9	41.5	45.7	51.4	59.8	73	87.4	97.8	100
	Sup.	9.3	10.6	14.0	19.1	28.0	44.4	55.9	65.8	77.0	97.3	100	100	100	100
JU-Delémont	Inf.	Pas de couche inférieure													
	Sup.	10	11.1	16.0	23.5	31.1	41.4	46.5	53.1	68.6	85.1	92.1	97.5	100	100
JU-St-Brais	Inf.	6.3	7.1	9.2	12.3	17.0	25.9	33.8	42.5	53.6	68.2	82.6	93.6	100	100
	Sup.	9.7	11.2	15.0	21.3	30.8	46.7	55.6	67.7	84.2	99.5	100	100	100	100
VD-Lonay	Inf.	8.8	9.9	12.3	15.4	20.5	29.2	34.7	40.1	48.7	63.1	74.2	88	100	100
	Sup.	10.1	11.5	13.8	17.4	24.3	37.0	42.7	44.4	48.4	64	88.9	98.6	100	100
VS-Bovernier	Inf.	6.7	7.8	10.7	17.4	27.7	40.1	49.2	59.7	72.1	85.3	98.5	100	100	100
	Sup.	12.0	13.8	18.0	25.5	35.9	50.9	62.6	73.1	86.2	98.4	100	100	100	100
VS-Monthey	Inf.	8.4	9.8	12.7	17.1	24.0	35.6	44.0	54.4	67.6	82	95.3	100	100	100
	Sup.	7.8	8.9	12.4	16.9	23.4	33.9	40.4	46.5	52.5	63.6	85.9	100	100	100
ZH-Bertschikon	Inf.	8.5	9.7	12.8	18.3	26.6	38.0	46.3	55.9	66.5	78.2	91.2	100	100	100
	Sup.	9.2	10.6	13.8	19.6	28.1	38.4	45.2	53.9	64.1	75	91.7	100	100	100

Tableau 4: Granulométries des plaques prélevées (% passant par le tamis).

Site	Couche	Taille max. de granulats [mm]
FR-Kleingurmels	Inf.	11.2
	Sup.	22.4
FR-Montbovon	Inf.	31.5
	Sup.	11.2
GR-Davos	Inf.	22.4
	Sup.	16
GR-Grüsch	Inf.	22.4
	Sup.	22.4
GR-S-chanf	Inf.	31.5
	Sup.	11.2
JU-Delémont	Inf.	-
	Sup.	22.4
JU-St-Brais	Inf.	22.4
	Sup.	11.2
VD-Lonay	Inf.	22.4
	Sup.	22.4
VS-Bovernier	Inf.	16
	Sup.	11.2
VS-Monthey	Inf.	16
	Sup.	16
ZH-Bertschikon	Inf.	16
	Sup.	16

Tableau 5: Taille maximale des granulats.

### 3.4.2 Liant

Les caractéristiques mesurées sur le liant bitumineux récupéré selon la norme SN 670 510 [38] ont été:

- Température Anneau et Bille
- Pénétration à 25°C
- Indice de pénétration

Site	Couche	Température A&B [°C]	Pénétration à 25°C [10 <sup>-1</sup> mm]	Indice de pénétration
FR - Kleingurmels	Inférieure	56.0	48	0.12
	Supérieure	58.9	42	0.40
FR - Montbovon	Inférieure	50.1	71	-0.30
	Supérieure	54.7	45	-0.32
GR - Davos	Inférieure	49.7	67	-0.54
	Supérieure	53.5	72	0.62
GR - Grüşch	Inférieure	51.9	63	-0.16
	Supérieure	57.8	36	-0.13
GR - S-chanf	Inférieure	46.0	98	-0.51
	Supérieure	51.2	72	0.04
JU - Delémont	Inférieure	Pas de couche inférieure		
	Supérieure	51.2	64	-0.28
JU - St-Brais	Inférieure	47.9	77	-0.67
	Supérieure	55.4	44	-0.23
VD - Lonay	Inférieure	59.5	44	0.62
	Supérieure	59.6	42	0.57
VS - Bovernier	Inférieure	63.0	28	0.34
	Supérieure	62.2	30	0.30
VS - Monthey	Inférieure	56.8	43	0.04
	Supérieure	50.2	60	-0.71
ZH - Bertschikon	Inférieure	50.5	60	-0.62
	Supérieure	55.9	40	-0.30

Tableau 6: Valeurs caractéristiques des bitumes

### 3.4.3 Enrobé bitumineux

Les caractéristiques mesurées sur l'enrobé bitumineux ont été:

- Masse volumique apparente
- Courbe granulométrique
- Teneur en liant (sur enrobé et sur granulats)
- Rapport filler/bitume
- Module de richesse



Site	Couche	Teneur en liant sur enrobé [%]	Teneur en liant sur granulats [%]	Rapport filler/bitume	Module de richesse	MVA moyen [g/cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides moy. [%]
FR - Kleingurmels	Inférieure	5.50	5.82	1.64	3.47	2.41	1.97
	Supérieure	5.79	6.15	1.69	3.59		
FR - Montbovon	Inférieure	4.76	5.00	1.93	2.99	2.42	2.00
	Supérieure	6.01	6.40	1.36	3.85		
GR - Davos	Inférieure	4.40	4.60	1.45	2.94	2.47	1.92
	Supérieure	6.02	6.40	1.81	3.67		
GR - Grüşch	Inférieure	5.01	5.28	1.57	3.23	2.48	1.07
	Supérieure	4.26	4.44	2.03	2.69		
GR - S-chanf	Inférieure	4.76	4.99	1.61	3.07	2.50	1.33
	Supérieure	6.28	6.70	1.38	3.99		
JU - Delémont	Inférieure	Pas de couche inférieure				2.45	0.74
	Supérieure	5.42	5.73	1.75	3.37		
JU - St-Brais	Inférieure	5.06	5.33	1.19	3.42	2.33	5.40
	Supérieure	6.32	6.75	1.44	3.98		
VD - Lonay	Inférieure	4.46	4.67	1.88	2.84	2.41	2.75
	Supérieure	5.46	5.77	1.75	3.42		
VS - Bovernier	Inférieure	5.15	5.43	1.23	3.42	2.34	3.77
	Supérieure	6.56	7.02	1.71	3.99		
VS - Monthey	Inférieure	5.81	6.17	1.36	3.76	2.41	2.34
	Supérieure	5.18	5.46	1.43	3.38		
ZH - Bertschikon	Inférieure	5.34	5.64	1.51	3.42	2.40	2.60
	Supérieure	5.58	5.91	1.56	3.54		

Tableau 7: Valeurs caractéristiques des enrobés

### 3.5 Essai d'orniérage

L'essai d'orniérage utilisé pour cette étude est défini dans la norme française [28] et a été réalisé à l'aide de l'orniéreur LPC. Il permet d'étudier le comportement en déformation permanente des mélanges hydrocarbonés et indique la profondeur d'ornière par fluage au moyen de la simulation d'une charge roulante sur une plaque rectangulaire d'enrobé bitumineux.

L'essai consiste à soumettre une plaque d'enrobé bitumineux à une charge verticale induite par une roue équipée d'un pneumatique qui provoque une diminution relative de l'épaisseur de la plaque (ornière). L'éprouvette est ajustée dans un moule puis testée à température constante. Le pneumatique se déplace suivant le grand axe de la plaque par un mouvement sinusoïdal dont la fréquence et l'amplitude sont fixées. La charge verticale est maintenue constante durant l'essai.

L'appareillage pour l'essai est composé de:

- une roue équipée d'un pneumatique lisse de 400x8 cm avec une largeur de trace de 8 cm ± 0.5 cm
- un moule non déformable de dimensions intérieures 180x500x100 mm

- une jauge de profondeur d'une précision de 0.1 mm
- une enceinte ventilée pouvant garantir une température constante au sein de l'éprouvette avec une variabilité de  $\pm 0.2$  °C
- une jauge de contrôle de température au sein de l'éprouvette

Les éprouvettes issues des prélèvements sur les différentes chaussées ont été soigneusement mesurées puis adaptées par sciage pour finalement être scellées au plâtre dans le moule.

L'essai a été réalisé dans les conditions suivantes:

- course du pneumatique: 410 mm  $\pm$  5 mm
- fréquence du mouvement cyclique de la roue: 1 Hz  $\pm$  0,1 Hz
- pression du pneumatique: 0,6 MPa  $\pm$  0,01 MPa
- charge appliquée: 5000 N  $\pm$  relevé statiquement au centre de l'éprouvette

Une fois la plaque scellée dans le moule, elle est mise en place dans l'orniéreur et l'éprouvette subit d'abord 1000 cycles charge roulante à température ambiante. Après cette phase initiale, les mesures du profil de l'éprouvette sont relevées au droit de 15 points de mesure selon la Figure 7.

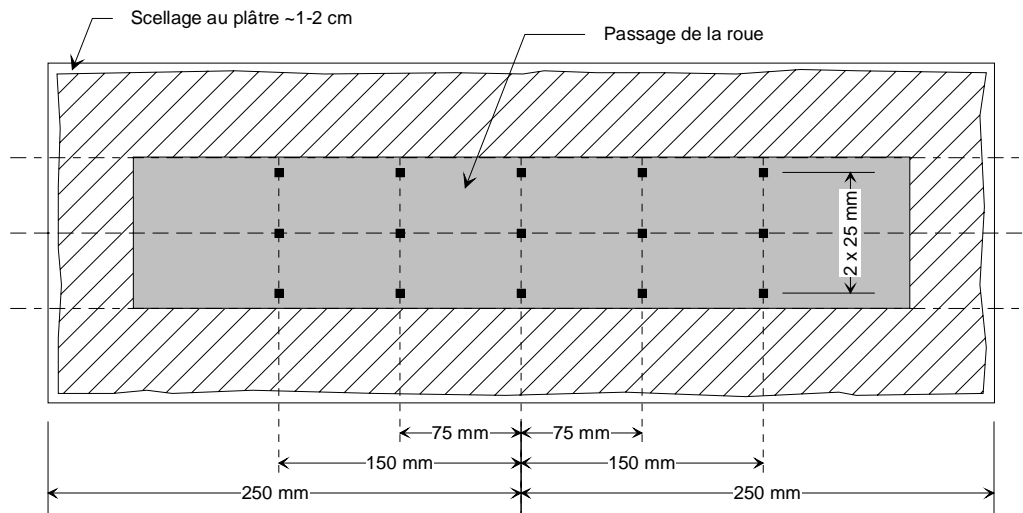


Figure 7: Localisation des points de mesure

Après cette phase initiale, la température de l'essai est réglée et l'essai peut commencer dès que la température au sein du matériau a atteint la température d'essai. La charge roulante est appliquée et les ornières sont mesurées à 30, 100, 300, 1000 puis tous les 1000 jusqu'à 10'000, puis encore tous les 5000 jusqu'à 60'000. Avant chaque mesure de profondeur d'ornière, la température de l'éprouvette est relevée. La moyenne de toutes les températures mesurées représente la température réelle moyenne de l'essai.

En considérant les quinze points de mesure définis (Figure 7) et pour chaque mesure d'ornière aux différents cycles, la profondeur d'ornière globale, pour chaque mesure, est calculée:

$$P_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^{15} m_{ij} - m_{0j}}{15 \cdot E} \quad [\%] \quad (3.1)$$

avec  $P_i$ : profondeur d'ornière globale [%]

$E$ : épaisseur de l'éprouvette testée [mm]

$m_{ij}$  et  $m_{0j}$ : mesures faites aux cycles  $i$  et à la phase initiale 0 [mm]

Au minimum, l'essai doit porter sur deux éprouvettes de même composition et il est interrompu si la moyenne des valeurs de  $(m_{ij} - m_{0j})$  est supérieure à 15 mm.

La courbe d'évolution de  $P_i$  en fonction du nombre de cycles est tracée sur un graphique à coordonnées bi-logarithmiques. Une relation entre  $P_i$  et le nombre de cycles est recherchée, avec une équation de la forme:

$$Y = A \cdot \left( \frac{N}{1000} \right)^b \quad (3.2)$$

avec  $Y$ : profondeur d'ornière à  $N$  cycles

$A$ : profondeur d'ornière à 1000 cycles

$b$ : pente de la droite (en coordonnées logarithmiques)

Les courbes d'évolution de l'ornière en fonction du nombre de cycles se présentent sous la forme suivante et figurent à l'annexe 10.3.

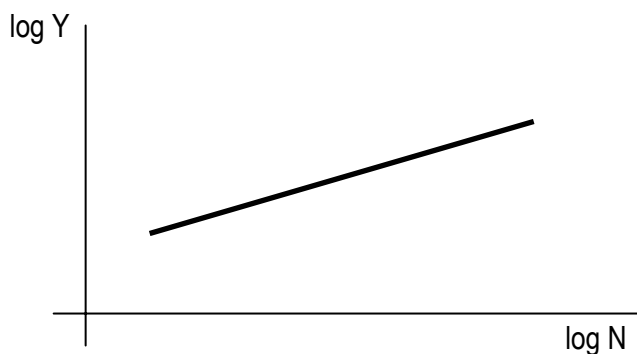


Figure 8: Allure des courbes d'orniérage

### L'essai d'orniérage dans les normes suisses:

La procédure de l'essai d'orniérage n'est pas clairement définie dans les normes suisses. Cependant, la norme SN 640 431b [34] introduit des valeurs limites pour l'essai d'orniérage tel qu'il est défini dans [28]. Ces valeurs, basées sur le réseau routier national français, ont été modifiées en tenant compte des charges d'essieu et des conditions de circulation spécifiques suisses.

Les valeurs limites recommandées pour la profondeur d'ornière (en % de l'épaisseur de l'éprouvette testée) sont données uniquement pour les bétons bitumineux des chaussées fortement sollicitées, ayant des enrobés de type S ou H, qui doivent respecter ces exigences.

Sorte d'enrobé	AB		HMT	
	S	H	S	H
Température d'essai	60°C	60°C	60°C	60°C
Nombre de cycles	10'000	30'000	10'000	30'000
Déformation admissible	<10%	<10%	≤10%	≤8%

Tableau 8: Valeurs limites recommandées pour la profondeur d'ornière [34]

### 3.6 Résultats des essais

Les résultats des essais d'orniérage des plaques prélevées sur les onze sites sont représentés par le nombre de passages de la charge roulante en abscisse et le pourcentage d'ornière en ordonnée. L'équation qui représente l'évolution de l'ornière en fonction du nombre de cycles d'application de charge est de la forme de (3.2). Pour chaque plaque, l'essai a tout d'abord été réalisé à une température de 50°C puis, en fonction du comportement du matériau et de sa susceptibilité à cette température, d'autres essais ont été menés à bien à deux températures supplémentaires différentes, soit à:

- 55°C et 60°C si le comportement à 50°C permettait d'atteindre les 60'000 cycles
- 40°C et 45°C si, à 50°C, le matériau atteignait la valeur limite d'orniérage de 15%

Pour chaque matériau testé et chaque température d'essai, les deux coefficients A et b issus de l'essai d'orniérage, ainsi que les coefficients de corrélation ont été déterminés (Tableau 9).

Site	Température d'essai [°C]	Equation d'orniérage	A	b	R <sup>2</sup>
FR - Kleingurmels	50	$Y=2.136 (N/1000)^{0.4051}$	2.136	0.4051	0.9928
FR - Kleingurmels	55	$Y=4.237 (N/1000)^{0.4953}$	4.237	0.4953	0.9988
FR - Kleingurmels	60	$Y=6.339 (N/1000)^{0.5362}$	6.339	0.5362	0.9942
FR - Montbovon	45	$Y=1.871 (N/1000)^{0.3669}$	1.871	0.3669	0.9972
FR - Montbovon	50	$Y=3.243 (N/1000)^{0.3796}$	3.243	0.3796	0.9866
FR - Montbovon	55	$Y=5.565 (N/1000)^{0.5824}$	5.565	0.5824	0.9996
GR - Davos	40	$Y=1.680 (N/1000)^{0.3331}$	1.680	0.3331	0.9902
GR - Davos	45	$Y=2.791 (N/1000)^{0.4238}$	2.791	0.4238	0.9980
GR - Davos	50	$Y=4.735 (N/1000)^{0.558}$	4.735	0.5580	0.9956
GR - Grüşch	50	$Y=1.870 (N/1000)^{0.387}$	1.870	0.3870	0.9982
GR - Grüşch	55	$Y=2.776 (N/1000)^{0.3635}$	2.776	0.3635	0.9989
GR - Grüşch	60	$Y=4.004 (N/1000)^{0.5613}$	4.004	0.5613	0.9992
GR - S-chanf	40	$Y=1.680 (N/1000)^{0.4779}$	1.680	0.4779	0.9963
GR - S-chanf	45	$Y=2.885 (N/1000)^{0.5149}$	2.885	0.5149	0.9955
GR - S-chanf	50	$Y=5.548 (N/1000)^{0.6353}$	5.548	0.6353	0.9918
JU - Delémont	40	$Y=1.524 (N/1000)^{0.5135}$	1.524	0.5135	0.9975
JU - Delémont	45	$Y=3.843 (N/1000)^{0.5139}$	3.843	0.5139	0.9968
JU - Delémont	50	$Y=6.257 (N/1000)^{0.6943}$	6.257	0.6943	0.9979
JU - St Brais	50	$Y=2.108 (N/1000)^{0.2027}$	2.108	0.2027	0.9893
JU - St Brais	55	$Y=2.935 (N/1000)^{0.1869}$	2.935	0.1869	0.9739
JU - St Brais	60	$Y=2.926 (N/1000)^{0.1937}$	2.926	0.1937	0.9803
VD - Lonay	45	$Y=1.457 (N/1000)^{0.3137}$	1.457	0.3137	0.9844
VD - Lonay	50	$Y=2.147 (N/1000)^{0.2925}$	2.147	0.2925	0.9954
VD - Lonay	55	$Y=2.019 (N/1000)^{0.3212}$	2.019	0.3212	0.9949
VD - Lonay	60	$Y=3.869 (N/1000)^{0.4306}$	3.869	0.4306	0.9988
VS - Bovernier	45	$Y=1.230 (N/1000)^{0.2506}$	1.230	0.2506	0.9872
VS - Bovernier	50	$Y=1.678 (N/1000)^{0.3997}$	1.678	0.3997	0.9320
VS - Bovernier	55	$Y=2.444 (N/1000)^{0.3441}$	2.444	0.3441	0.9869
VS - Bovernier	60	$Y=4.478 (N/1000)^{0.4013}$	4.478	0.4013	0.9961
VS - Monthey	40	$Y=1.667 (N/1000)^{0.369}$	1.667	0.3690	0.9927
VS - Monthey	45	$Y=2.564 (N/1000)^{0.4198}$	2.564	0.4198	0.9714
VS - Monthey	50	$Y=5.718 (N/1000)^{0.7507}$	5.718	0.7507	0.9814
ZH - Bertschikon	40	$Y=1.257 (N/1000)^{0.3545}$	1.257	0.3545	0.9921
ZH - Bertschikon	45	$Y=1.635 (N/1000)^{0.515}$	1.635	0.5150	0.9859
ZH - Bertschikon	50	$Y=3.007 (N/1000)^{0.5458}$	3.007	0.5458	0.9968
ZH - Bertschikon	55	$Y=4.983 (N/1000)^{0.7044}$	4.983	0.7044	0.9964

Tableau 9: Equations d'orniérage issues des essais

### 3.6.1 Vérification des résultats selon la norme SN 640 431b [34]

D'après [34], les enrobés de type S et H doivent être soumis à l'essai d'orniérage LCPC (Tableau 8). L'évaluation de la conformité des résultats des essais d'orniérage avec la norme [34] s'est donc fait comme suit:

- Si un essai à 60 °C a été réalisé, la valeur de l'ornière à 10'000 cycles obtenue grâce aux paramètres de la régression suivante a été considérée:

$$T(10'000) = A \cdot \left( \frac{N}{1'000} \right)^b = A \cdot \left( \frac{10'000}{1'000} \right)^b$$

avec T: valeur de l'ornière à 10'000 cycles

A: ornière à 1000 cycles

b: pente de la droite bi-logarithmique.

- Si aucun essai n'a pu être réalisé à 60°C en raison du comportement trop sensible à la température de l'échantillon, la valeur à 10'000 cycles à la température inférieure la plus proche a été considérée.

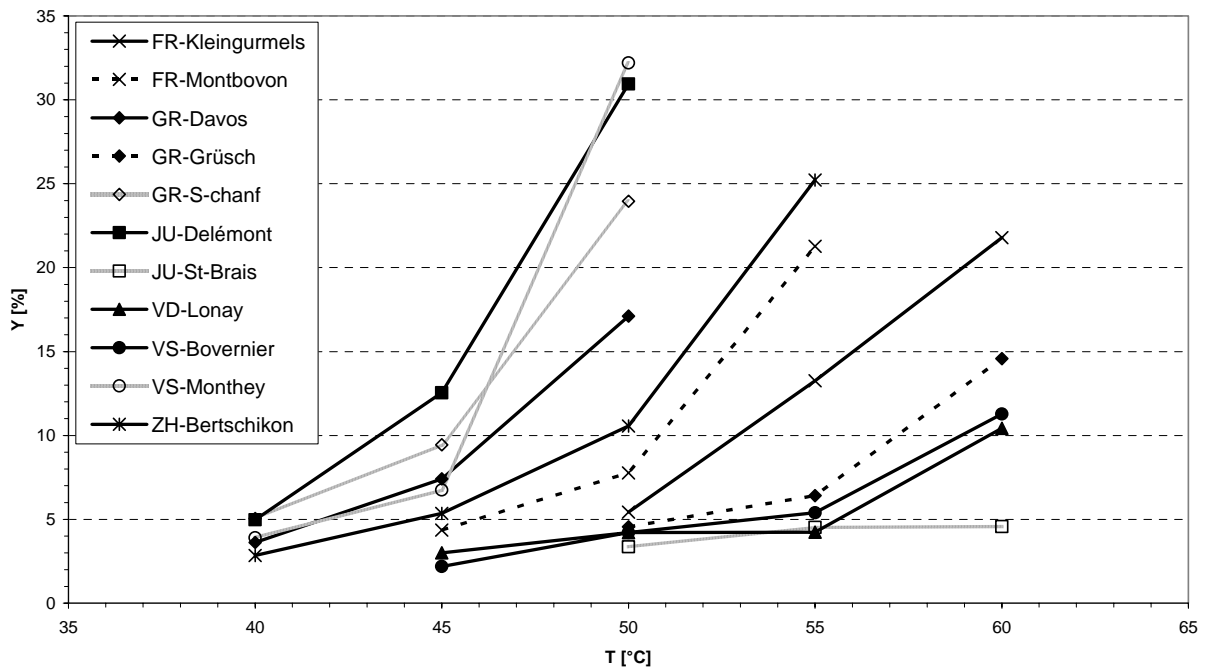


Figure 9: Ornières à 10'000 cycles (toutes températures)

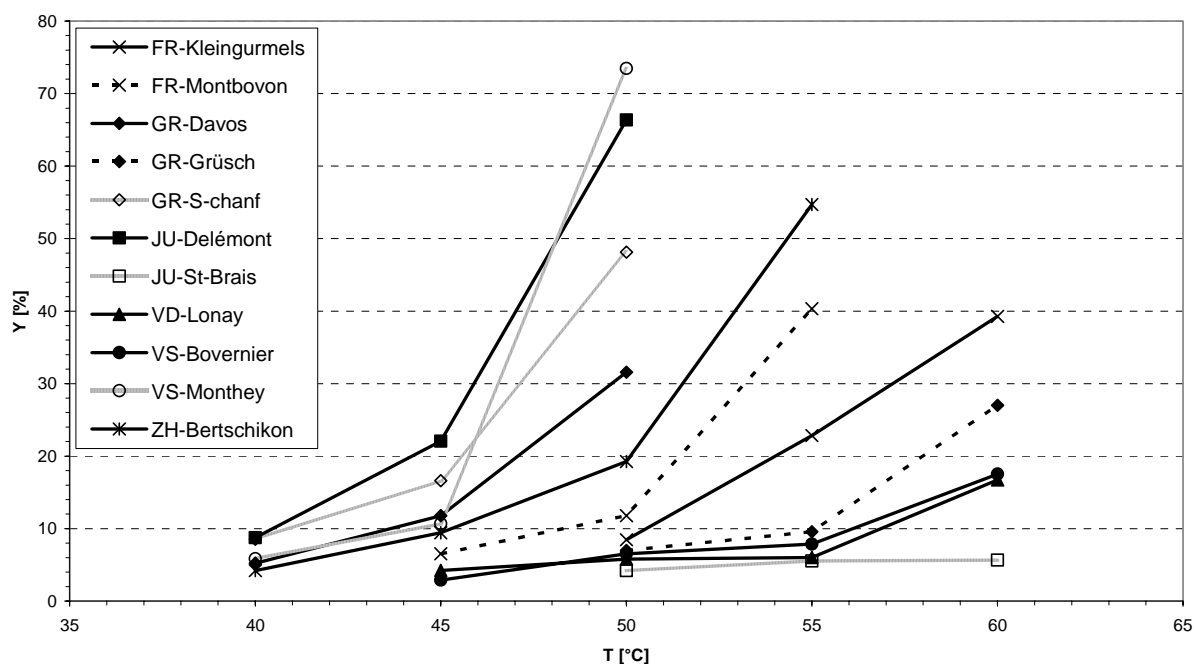


Figure 10: Ornières à 30'000 cycles (toutes températures)

Site	Température d'essai considérée[°C]	Ornière à 10'000 cycles [%]	Ornière à 30'000 cycles [%]
FR - Kleingurmels	60	<b>21.79</b>	<b>39.27</b>
FR - Montbovon	55	<b>21.27</b>	<b>40.34</b>
GR - Davos	50	<b>17.11</b>	<b>31.59</b>
GR - Grüsch	60	<b>14.58</b>	<b>27.01</b>
GR - S-chanf	50	<b>23.96</b>	<b>48.14</b>
JU - Delémont	50	<b>30.95</b>	<b>66.37</b>
JU - St Brais	60	4.57	5.66
VD - Lonay	60	10.43	<b>16.74</b>
VS - Bovernier	60	<b>11.28</b>	<b>17.53</b>
VS - Monthey	50	<b>32.20</b>	<b>73.47</b>
ZH - Bertschikon	55	<b>25.23</b>	<b>54.70</b>

Tableau 10: Valeurs de l'ornièrage à 10 000 et 30'000 cycles (en gras: valeurs ne satisfaisant pas la norme)

Comme la norme fixe, pour une température d'essai de 60°C, une déformation admissible de 10% maximum à 10'000 cycles (type S) et 30'000 cycles (type H), on peut constater que seuls les échantillons provenant des sites de St-Brais et de Lonay satisfont les exigences de la norme à 10'000 cycles, tandis qu'à 30'000 cycles, seul le matériau de St-Brais satisfait ces exigences. Les autres échantillons se sont mal comportés puisqu'ils ont tous une valeur d'ornièrage à 10'000 et 30'000 cycles supérieure à 10%.

## 4 Caractérisation des sites (Trafic, vitesse, température)

### 4.1 Charges de trafic

Le nombre de charges subies par la chaussée durant sa mise en service, considérée depuis la date de la pose du revêtement jusqu'à la date de prélèvement des plaques, a été calculé selon les indications de la norme SN 640 320a [33].

Le trafic pondéral équivalent total  $W$  est le nombre total d'essieux de référence qui passent sur la chaussée pendant la période de mise en service ( $n$  années). Un essieu de référence est défini comme étant un essieu dont la charge est de 8,16 t et dont la définition internationale est ESAL (Equivalent Single Axle Load).

Pour les sites où toutes les données annuelles ont été accessibles, le calcul du trafic pondéral équivalent total s'est fait d'après un calcul du nombre de poids lourds total par an (basé sur le % PL) ayant circulé sur la chaussée entre le moment de la pose de l'enrobé jusqu'au moment de son extraction, puis en additionnant les différentes valeurs obtenues pour chaque année d'utilisation de la chaussée. Par contre, pour les sites où seulement des valeurs ponctuelles du TJM étaient disponibles sur toute la durée d'utilisation considérée, il a fallu recourir à l'utilisation d'un taux d'augmentation annuel constant, de telle sorte à satisfaire l'équation [33]:

$$TF_n = \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot n} \cdot TF_0 \quad (4.1)$$

avec  $TF_n$  : trafic pondéral équivalent journalier calculé

$TF_0$  : trafic pondéral équivalent journalier de référence

$r$  : taux d'accroissement annuel [-]

$n$  : durée d'utilisation totale considérée [années]

Une fois que le trafic journalier moyen total est estimé (TJM), on le multiplie par le pourcentage de PL, par un facteur d'équivalence moyen du trafic lourd  $k$  (Tableau 11), par un coefficient de répartition du trafic en fonction du nombre de voies  $fv$  (Tableau 12), puis par le nombre de jours qui composent l'année (en général 365 jours). La valeur obtenue est le trafic pondéral équivalent annuel. Pour obtenir le trafic pondéral équivalent total, il faut additionner tous les trafics pondéraux équivalents annuels correspondant à la durée d'utilisation totale de la chaussée:

$$W = k \cdot fv \cdot 365 \sum_{i=1}^n TJM_i \cdot \%PL_i \quad (4.2)$$

avec  $W$ : trafic pondéral équivalent total

TJM<sub>i</sub>: trafic journalier moyen

%PL: pourcentage de poids lourds

$k$ : facteur d'équivalence moyen du trafic lourd selon le type de route

$fv$ : coefficient de répartition du trafic sur la voie la plus sollicitée



n: nombre total d'années d'utilisation de la chaussée

Type de route selon [31]	k (chaussée en enrobé bitumineux)
Routes à grand débit (RGD): autoroutes de transit	1,5
Routes à grand débit (RGD): autoroutes	1,3
Routes principales (RP)	1,2
Routes de liaison (RL)	1

Tableau 11: Facteurs d'équivalence moyens du trafic lourd selon le type de route [33]

Route à	Répartition du trafic pondéral total						
1 voie	100%						
2 voies	50%		50%				
3 voies	50%		0%	50%			
2×2 voies	45%		5%	5%	45%		
2×3 voies	45%		5%	0%	0%	5%	45%

Tableau 12: Répartition du trafic pondéral total en fonction du nombre de voies [33]

Le détail du calcul de la charge de trafic pondéral total pour chaque site figure en annexe 10.4. Les résultats finaux obtenus figurent dans le tableau ci-dessous.

Site	Durée de service du revêtement	%PL	fv	k	W total [ESAL]
FR_Kleingurmels	24 ans	8.00%	50%	1.20	2'464'813
FR_Montbovon	13 ans	6.00%	50%	1.20	569'422
GR_Davos	9 ans	3.98%	50%	1.20	240'425
GR_Grüşch	14 ans	6.38%	50%	1.20	2'212'906
GR_S-chanf	15 ans	5.07%	50%	1.20	458'403
JU_Delémont	20 ans	3.24%	50%	1.20	2'492'605
JU_St-Brais	19 ans	7.05%	50%	1.20	894'259
VD_Lonay	19 ans	6.03%	45%	1.30	13'172'339
VS_Bovernier	16 ans	6.00%	50%	1.20	1'530'241
VS_Monthey	15 ans	3.00%	50%	1.20	963'162
ZH_Bertschikon	16 ans	10.39%	45%	1.30	9'808'574

Tableau 13: Trafic pondéral équivalent total calculé

Trafic PL / année

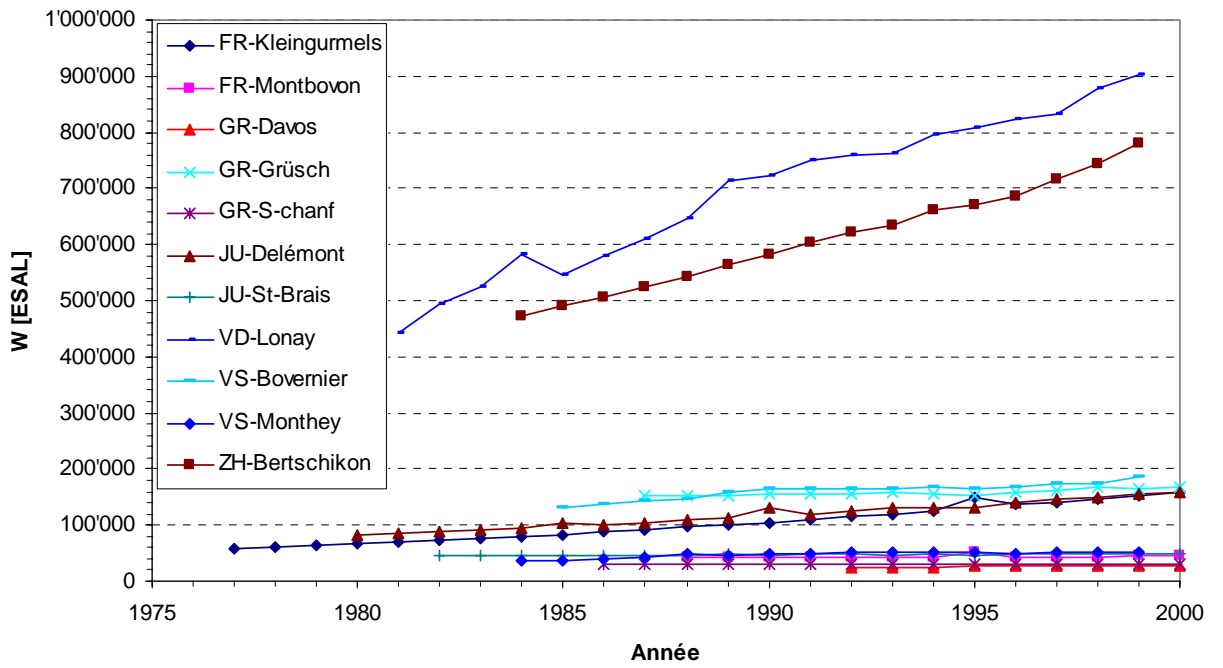


Figure 11: Trafic pondéral équivalent annuel (tous sites confondus)

W total

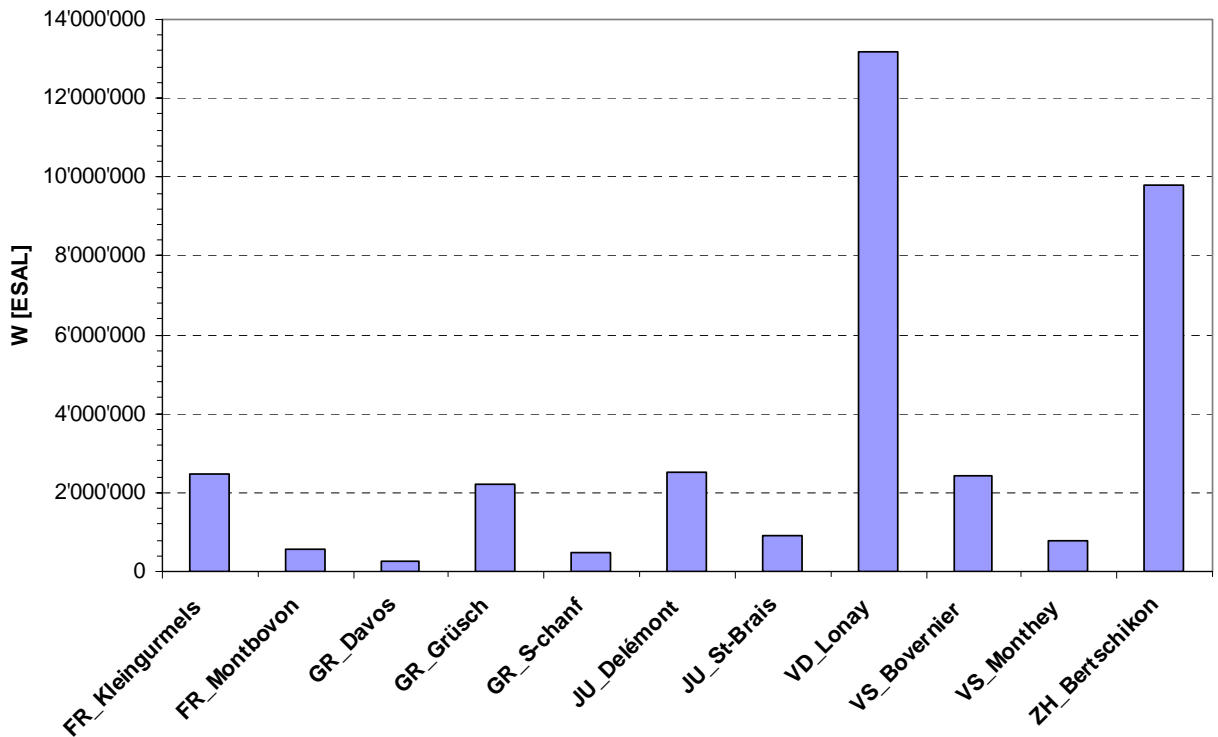


Figure 12: Trafic pondéral équivalent total (tous sites confondus)

## 4.2 Vitesses déterminantes

Pour chaque site, la vitesse déterminante prise en compte et considérée comme plus néfaste pour la route vis-à-vis de l'orniérage, est la vitesse de circulation des poids lourds sur le tronçon considéré. En effet, la vitesse est extrêmement pénalisante en matière d'orniérage puisqu'un poids lourd cause des dégâts d'orniérage environ trois à cinq fois plus grands à 30 km/h qu'à 90 km/h, quels que soient le type et la silhouette des véhicules lourds [18].

Actuellement, en Suisse, la vitesse maximale des poids lourds est réglementée et ne doit pas excéder 80 km/h pour les trains routiers et les véhicules articulés (art. 5, OCR [14]).

### 4.2.1 Mesure des vitesses réelles

Pour six des onze sites étudiés, des mesures réelles de vitesse ont été effectuées à l'aide d'un radar manuel calibré au Lavoc. La calibration de l'appareil a été faite par deux opérateurs, en mesurant depuis le bord de la route la vitesse d'un véhicule muni du GPS (Global Positioning System) et dont la vitesse effective était donnée en permanence par cinq satellites. Des mesures ont été relevées tous les 10 km/h et ce pour des vitesses allant de 20 à 100 km/h. Pour chaque palier de vitesse, quatre passages du véhicule ont été effectués et six mesures de vitesse ont été relevées pour chaque passage. Des six mesures, trois ont été prises dans la phase d'approche du véhicule et les trois autres lors de son éloignement. En procédant ainsi, les éventuelles variations des résultats en fonction du moment de mesure auraient pu être décelées, ce qui n'a pas été le cas. En effet, l'appareil n'a pas décelé de différence dans les résultats, que les mesures soient prises à l'approche ou à l'éloignement du véhicule. Toutefois, pour tout le paquet de mesures, la marge moyenne d'erreur de mesure observée dans le processus de calibration est de  $\pm 1$  km/h.

Vitesse véh. (GPS) [km/h]	Vitesse mesurée au radar [km/h]										
	Approche du véh.	Approche du véh.	Approche du véh.	moy. 1	moy. 2	Eloign. du véh.	Eloign. du véh.	Eloign. du véh.	moy. 1	moy. 2	moy. générale
20	21	22	22	<b>22</b>	<b>21</b>	21	22	22	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>21</b>
	22	23	22	<b>22</b>		23	22	22	<b>22</b>		
	18	19	21	<b>19</b>		19	21	22	<b>21</b>		
	21	22	22	<b>22</b>		19	21	22	<b>21</b>		
30	29	30	31	<b>30</b>	<b>31</b>	29	30	31	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>31</b>
	29	30	31	<b>30</b>		30	31	30	<b>30</b>		
	33	31	31	<b>32</b>		30	31	33	<b>31</b>		
	30	31	31	<b>31</b>		30	31	30	<b>30</b>		
40	41	42	41	<b>41</b>	<b>41</b>	39	41	42	<b>41</b>	<b>40</b>	<b>41</b>
	39	41	41	<b>40</b>		38	41	41	<b>40</b>		
	39	41	41	<b>40</b>		38	41	42	<b>40</b>		
	41	42	41	<b>41</b>		39	41	41	<b>40</b>		
50	53	53	53	<b>53</b>	<b>51</b>	53	53	53	<b>53</b>	<b>51</b>	<b>51</b>
	51	51	51	<b>51</b>		51	51	51	<b>51</b>		
	51	49	49	<b>50</b>		51	51	51	<b>51</b>		
	50	51	49	<b>50</b>		50	51	49	<b>50</b>		
60	57	58	58	<b>58</b>	<b>59</b>	60	61	61	<b>61</b>	<b>60</b>	<b>59</b>
	60	59	59	<b>59</b>		59	60	60	<b>60</b>		
	60	60	60	<b>60</b>		59	60	60	<b>60</b>		
	60	58	59	<b>59</b>		58	59	60	<b>59</b>		
70	68	67	67	<b>67</b>	<b>69</b>	68	70	70	<b>69</b>	<b>69</b>	<b>69</b>
	72	72	70	<b>71</b>		68	70	71	<b>70</b>		
	70	67	67	<b>68</b>		71	70	70	<b>70</b>		
	71	71	70	<b>71</b>		67	68	70	<b>68</b>		
80	80	81	79	<b>80</b>	<b>79</b>	78	79	80	<b>79</b>	<b>79</b>	<b>79</b>
	78	79	79	<b>79</b>		78	79	80	<b>79</b>		
	78	79	79	<b>79</b>		78	79	80	<b>79</b>		
	80	79	78	<b>79</b>		78	79	80	<b>79</b>		
90	92	91	90	<b>91</b>	<b>91</b>	90	91	91	<b>91</b>	<b>90</b>	<b>90</b>
	90	90	90	<b>90</b>		90	90	90	<b>90</b>		
	91	90	90	<b>90</b>		90	91	91	<b>91</b>		
	92	91	90	<b>91</b>		87	88	88	<b>88</b>		
100	103	102	102	<b>102</b>	<b>101</b>	99	100	100	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>101</b>
	103	102	100	<b>102</b>		98	99	100	<b>99</b>		
	102	102	102	<b>102</b>		102	103	102	<b>102</b>		
	100	99	100	<b>100</b>		99	100	100	<b>100</b>		

Tableau 14: Mesures des vitesses (phases d'approche et d'éloignement du véhicule).

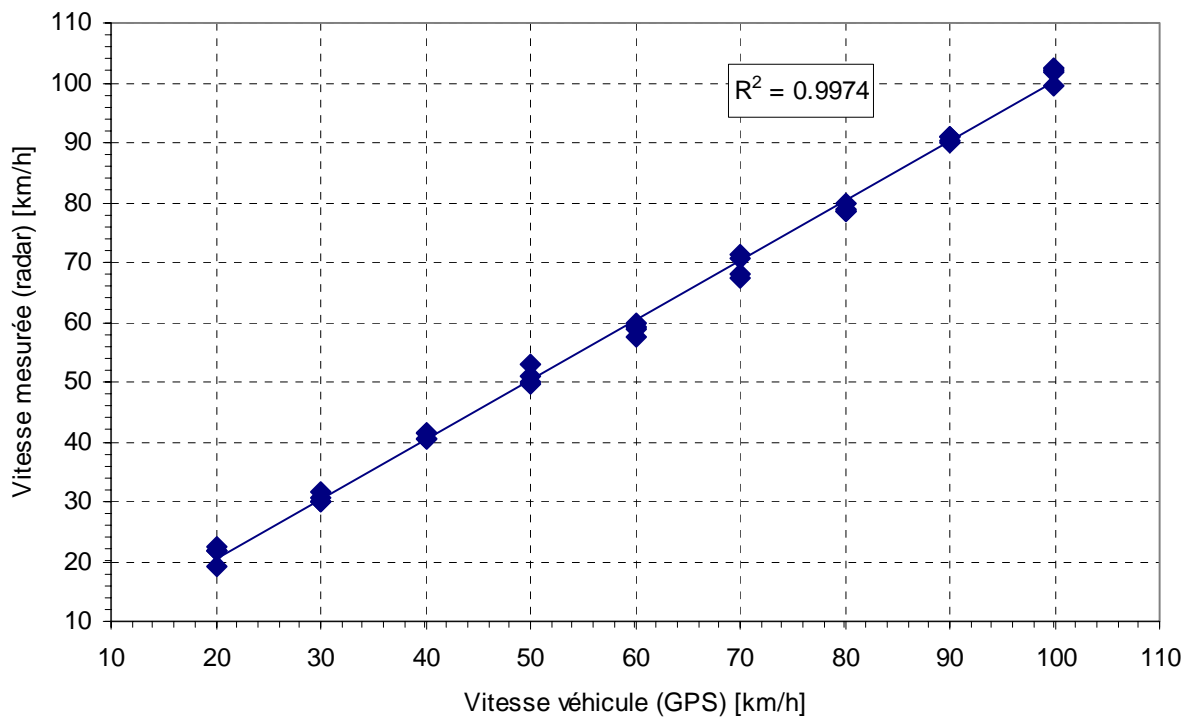


Figure 13: Mesures prises durant la phase d'approche du véhicule.

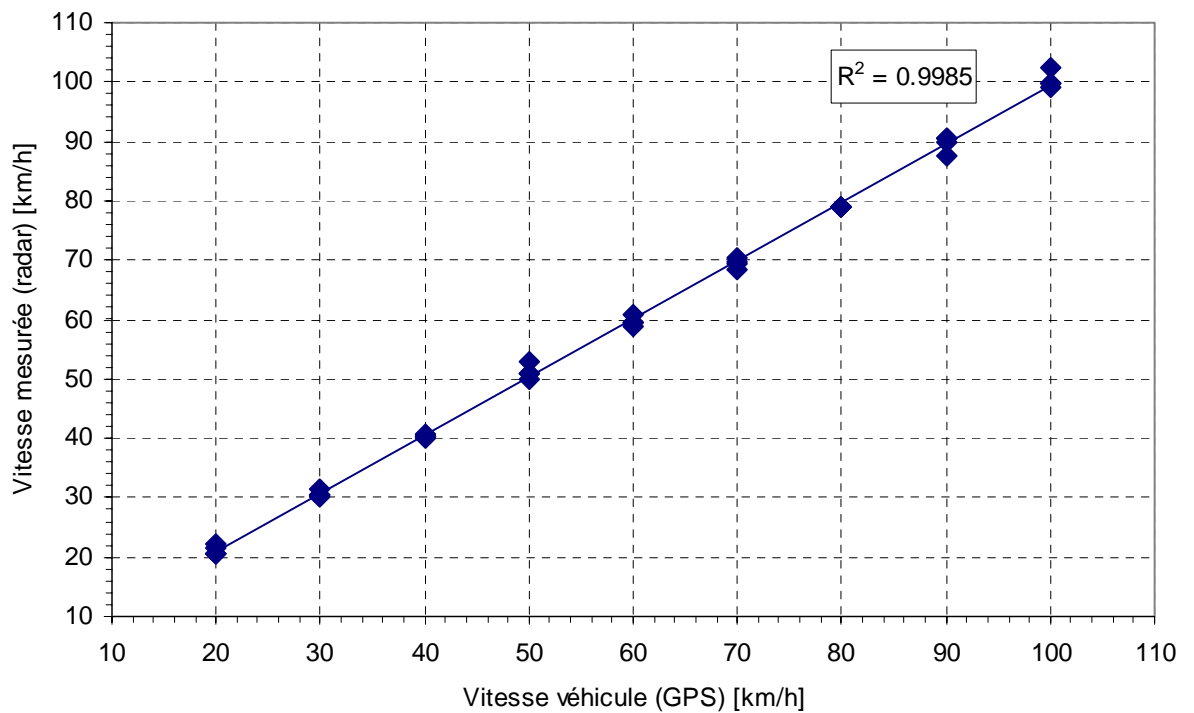


Figure 14: Mesures prises durant la phase d'éloignement du véhicule.

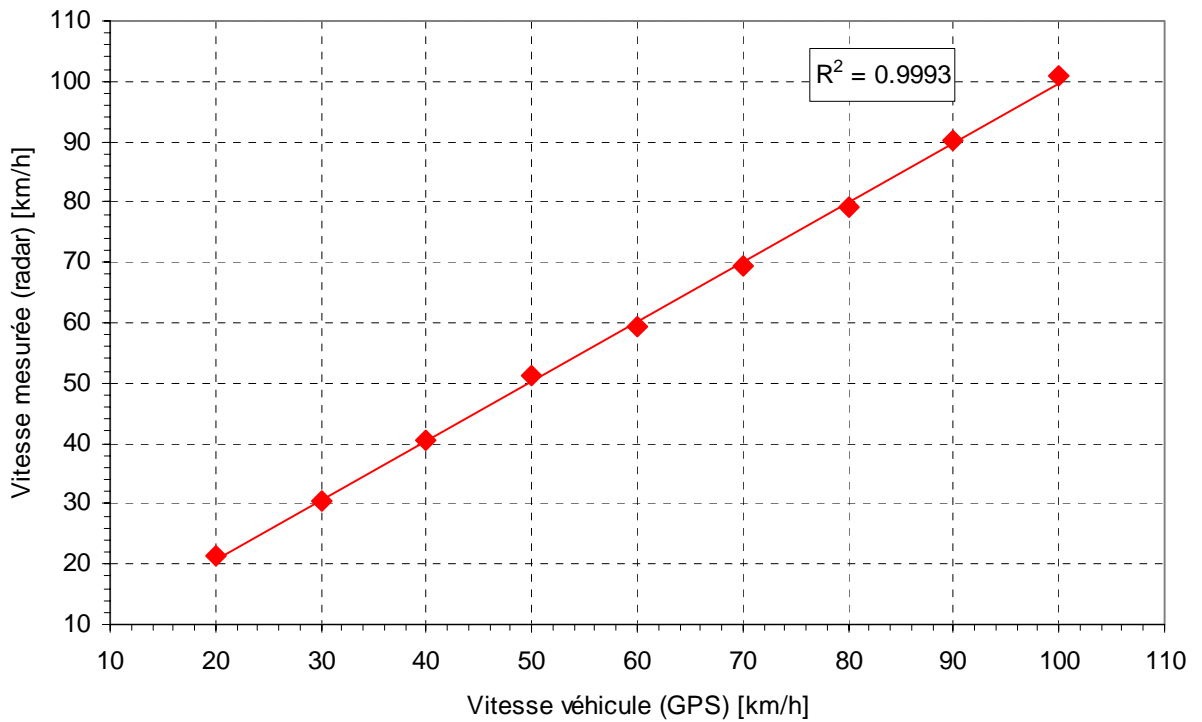


Figure 15: Valeurs moyennes de toutes les mesures de vitesse.

Les mesures des vitesses réelles ont servi à donner un ordre de grandeur de la vitesse effective sur les différents sites. Elles ont été effectuées de telle sorte à avoir un échantillon représentatif d'au moins 15 valeurs de mesures, les mercredis 12 et 26 mai 2004 sous une météo ensoleillée.

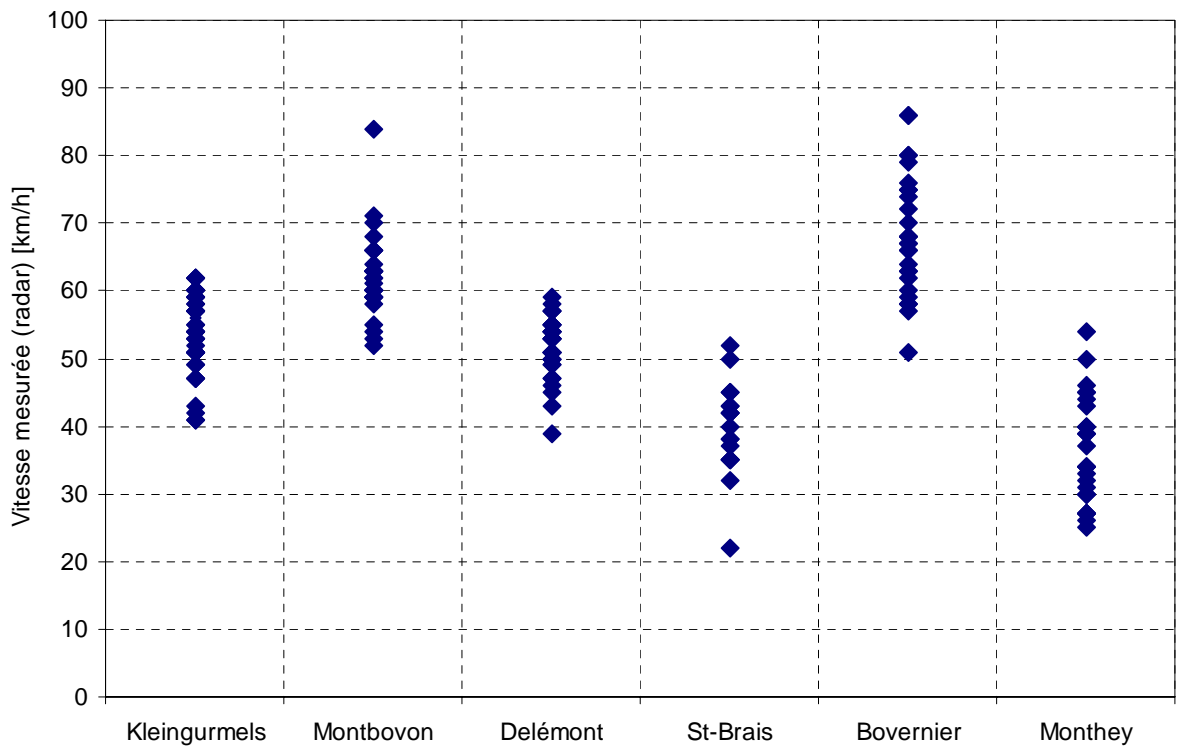


Figure 16: Mesure des vitesses réelles.

Pour déterminer s'il existe des valeurs aberrantes ou isolées dans les différents échantillons de mesures de vitesse du tableau précédent, le test de Grubbs a été appliqué selon les indications de la norme internationale ISO 5725-2:1994 [29]. Le test consiste à déterminer si les valeurs extrêmes composant un échantillon doivent être considérées comme étant aberrantes ou isolées. Si on identifie un échantillon de données  $x_i=1, 2, \dots, p$  en classant toutes les valeurs en ordre croissant, alors la statistique de Grubbs est:

- pour la plus grande valeur:  $G_p = (x_p - \bar{x})/s$

- pour la plus petite valeur:  $G_1 = (\bar{x} - x_1)/s$

où  $\bar{x}$  est la moyenne de l'échantillon et  $s$  son écart-type.

Après avoir effectué le test, trois possibilités peuvent être considérées:

- Si la statistique du test est inférieure ou égale à sa valeur critique définie dans une loi de Student par une probabilité d'erreur de 5%, la valeur testée est considérée comme correcte.
- Si la statistique du test est supérieure à sa valeur critique à 5% et inférieure ou égale à sa valeur critique à 1%, la valeur testée est considérée comme une valeur isolée signalée par un simple astérisque (\*).
- Si la statistique du test est supérieure à sa valeur critique à 1%, la valeur testée est considérée comme aberrante signalée par un double astérisque (\*\*).

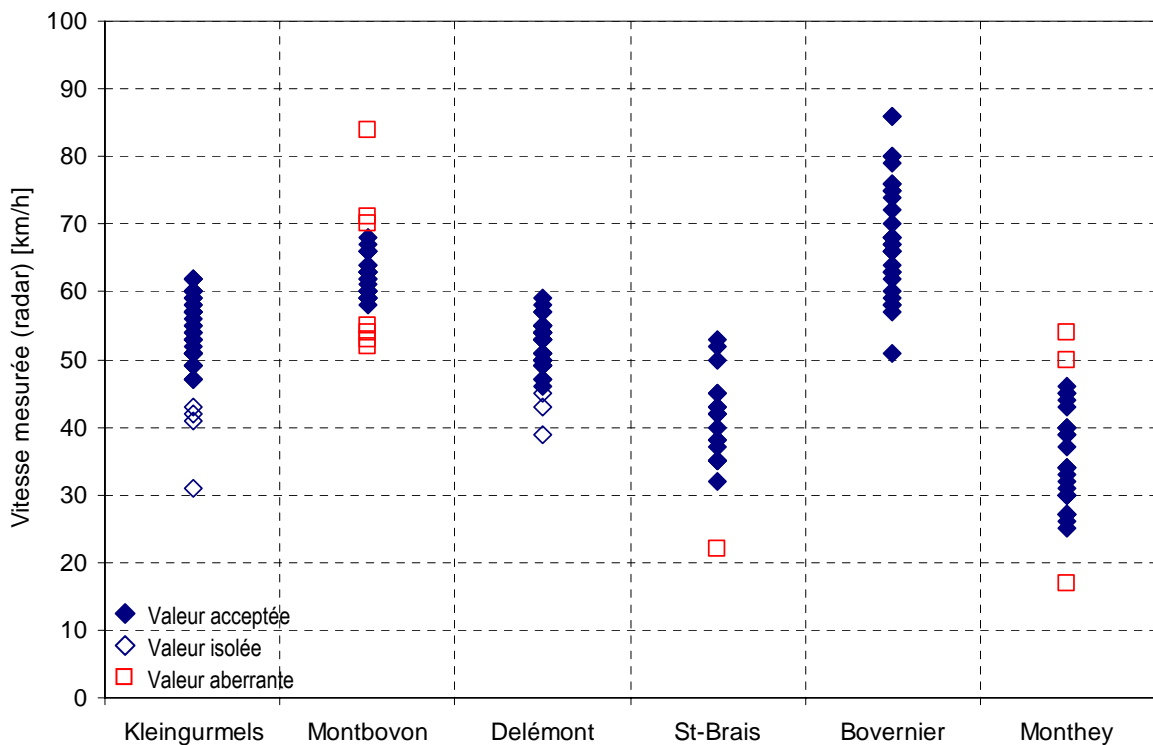


Figure 17: Localisation des valeurs acceptées, isolées et aberrantes (Test de Grubbs [29]).

Site	Kleingurmels	Montbovon	Delémont	St-Brais	Bovernier	Monthey
Vitesse minimale observée [km/h]	31	52	39	22	51	17
Vitesse maximale observée [km/h]	62	84	59	53	86	54
Moyenne de l'échantillon [km/h]	53	62	51	40	69	35
Ecart-type [km/h]	7	6	5	7	9	8

Tableau 15: Mesure des vitesses réelles et caractérisation de tout l'échantillon.

En omettant de considérer les valeurs aberrantes, on obtient de nouvelles valeurs de moyennes et d'écart-types (Tableau 16). On remarque que la variation des valeurs moyennes par rapport aux données de base est de l'ordre de  $\pm 2$  km/h.

Site	Kleingurmels	Montbovon	Delémont	St-Brais	Bovernier	Monthey
Vitesse minimale observée* [km/h]	31	58	46	32	51	25
Vitesse maximale observée* [km/h]	62	68	59	53	86	46
Moyenne de l'échantillon* [km/h]	53	62	53	41	69	35
Ecart-type* [km/h]	7	3	3	6	9	7

\* en écartant les valeurs aberrantes

Tableau 16: Nouvelle caractérisation de l'échantillon.

#### 4.2.2 Détermination des vitesses selon la norme SN 640 138a [32]

La vitesse des véhicules lents sur un tronçon donné dépend fortement de la déclivité et de la longueur disponible pour l'accélération ou la décélération. La norme SN 640 138a [32] rédigée à partir d'observations faites sur le réseau suisse peut également donner une bonne estimation de ces vitesses (Figure 18).

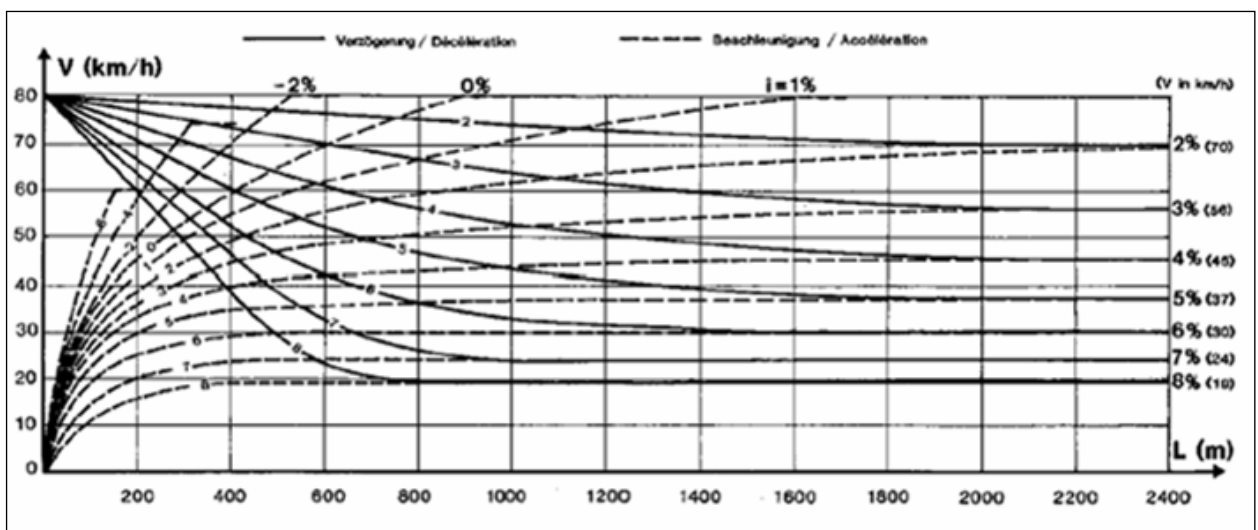


Figure 18: Vitesse des véhicules lents en déclivité [32]



Site	Vitesses légales [km/h]	V(PL) [km/h] d'après déclivités [32]
FR Kleingurmels	50	50
FR Montbovon	80	65
GR Davos	50	30
GR Grüşch	50	80
GR S-chanf	50	80
JU Delémont	80	50
JU St-Brais	80	37
VD Lonay	(120) 80	>80
VS Bovernier	80	63
VS Monthey	50	30
ZH Bertschikon	(120) 80	>80

Tableau 17: Vitesses des poids lourds d'après la Figure 18 extraite de la norme [32]

Pour certains sites, les administrations cantonales ont fourni des estimations quant à la vitesse pratiquée par les poids lourds. Ces valeurs ainsi que les valeurs calculées à l'aide de la norme [32] et les mesures in situ ont été relevées dans le Tableau 18.

Site	Vmax légale sur site [km/h] [14]	V(PL) [km/h] d'après déclivités [32]	V(PL) [km/h] selon indications cantons	V(PL) [km/h] selon mesures in situ	V(PL) [km/h] selon mesures in situ*	Vitesse retenue pour le modèle [km/h]
FR Kleingurmels	50	50	50	53	53	53
FR Montbovon	80	65	65	62	62	62
GR Davos	50	30	-	-	-	30
GR Grüşch	50	80	-	-	-	80
GR S-chanf	50	80	-	-	-	80
JU Delémont	80	50	-	51	51	51
JU St-Brais	80	37	-	40	41	41
VD Lonay	(120) 80	>80	-	-	-	90
VS Bovernier	80	63	65	69	69	69
VS Monthey	50	30	25	35	35	35
ZH Bertschikon	(120) 80	>80	-	-	-	90

\* en écartant les valeurs aberrantes

Tableau 18: Vitesses des poids lourds selon diverses méthodes

### 4.3 Température déterminante

De même que dans le cas de la vitesse, la température influe sur l'orniérage en raison du comportement visqueux des enrobés bitumineux. Plus la température ambiante est élevée et plus la formation d'ornière sera accentuée.

L'influence de la température est difficile à évaluer, mais la température de l'enrobé à 2 cm sous la surface du revêtement apparaît comme étant pertinente selon Bense [7].

#### 4.3.1 Température du revêtement

L'étude menée par Angst [3] a mis en évidence les températures minimales et maximales qui apparaissent sur le territoire suisse avec une période de retour de 20 ans. Des valeurs de correction dépendant des emplacements sont également indiquées pour être en mesure de prendre en considération les conditions micro-climatiques locales (versant, cuvette, ville, forêt, etc.). Quatre éléments sont importants:

- Moyenne des maximaux journaliers de la température du revêtement durant les 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm ( $T_{s_{max,50\%}}$ )
- Valeur la plus élevée des maximaux journaliers de la température du revêtement durant les 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm sur une période de 20 ans ( $T_{s_{max,95\%}}$ )
- Valeur la plus basse de la température du revêtement durant une année ( $T_{s_{min,50\%}}$ )
- Valeur la plus basse sur 20 ans de la température du revêtement ( $T_{s_{min,95\%}}$ )

Pour calculer les températures maximales et minimales au sein du revêtement bitumineux à 2 cm de profondeur, la Suisse a été divisée en 8 régions. Dans chacune de ces régions, le calcul des valeurs maximales et minimales se fait à l'aide de la formule (4.3):

$$T_s = d + (h \cdot c) + l \quad (4.3)$$

- avec  $T_s$ : température du revêtement à 2 cm de profondeur
- $d$ : température régionale de base en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer (Tableau 19)
- $h$ : altitude au-dessus du niveau de la mer [km]
- $c$ : gradient de température en fonction de l'altitude [ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ] (Tableau 19)
- $l$ : valeur correctrice par rapport à la situation locale (Tableau 20)

Région	Altitude	$T_{s_{min}}$		$T_{s_{max}}$	
		$d$	$c$	$d$	$c$
Jura	200-1700 m	-8.3	-5.5	46.9	-5.0
Lac Léman	300-1700 m	-6.4	-7.3	46.1	-3.0
Plateau occidental	300-1700 m	-6.8	-6.7	46.1	-3.0
Plateau oriental/Préalpes	300-1700 m	-8.6	-5.7	46.1	-3.0
Préalpes Nord	300-2500 m	-7.5	-5.6	45.1	-2.4
Valais	300-2500 m	-8.3	-4.8	49.1	-4.5
Grisons	300-2500 m	-8.2	-6.5	47.7	-3.4
Sud des Alpes	200-2500 m	-6.9	-5.1	47.9	-3.8

Tableau 19: Températures régionales de base et gradients de température [3][1]

Situation	Minima [°C]	Maxima [°C]
Libre	0,0	0,0
Cuvette	-2,5	0,0
Nappe d'air froid	-6,0	1,0
Lac	2,0	-0,5
Ville	0,5	0,5
Versant sud	1,5	1,5
Versant est	0,7	0,0
Versant ouest	0,7	0,7
Forêt	0,0	-6,0

Tableau 20: Valeurs correctives d'après la situation locale [3]

Il s'avère que pour les régions du Valais, des Grisons et du Sud des Alpes, la formule (4.3) peut être améliorée et ainsi mieux approcher la variation des températures maximales selon l'altitude (4.4):

$$T_s = a \cdot h^3 + b \cdot h^2 + c \cdot h + d \quad (4.4)$$

avec  $h$ : altitude au-dessus du niveau de la mer [km]

$a, b, c, d$ : coefficients de la fonction d'après le Tableau 21

Région	Altitude	Coefficients			
		a	b	c	d
Valais	300-2500 m	-5.9	26.1	-37.8	60.3
Grisons	300-2500 m	-4.2	15.5	-19.6	51.8
Sud des Alpes	200-2500 m	-4.2	15.2	-17.2	50.2

Tableau 21: Coefficients régionaux [3][1]

Dans la présente étude, seules les valeurs maximales sont considérées, car ce sont celles qui sont les plus dommageables en ce qui concerne l'orniérage d'une chaussée. Une fois les températures maximales calculées à une profondeur de 2 cm à l'intérieur du revêtement, il faut déterminer une température maximale  $T_{s_{\max,95\%}}$  pour une période de retour de 20 ans ou qui n'est pas dépassée dans 95% des cas durant 20 ans.

$$T_{s_{\max,95\%}} = T_{s_{\max}} + 1,77 \cdot sd_{\max} \quad (4.5)$$

avec  $T_{s_{\max}}$ : température maximale du revêtement à 2 cm de profondeur

$sd_{\max}$ : écart-type standard d'après (Tableau 22)

Région	Ecart-type standard
En général	$sd_{\max} = 0.8 + 0.23 h$
Vallées alpines	$sd_{\max} = 0.5 + 0.24 h$

Tableau 22: Calcul des écarts-types standards [3]

Pour les sites où les prélèvements des plaques ont été effectués, les définitions de la région (Tableau 19), de la situation (Tableau 20) et de l'altitude (Tableau 3) ont été répertoriées dans le Tableau 23. Dans le Tableau 24 apparaissent les calculs des températures maximales dans le revêtement bitumineux à 2 cm de profondeur. Il s'est fait en utilisant l'équation (4.4) pour les lieux situés dans les régions du Valais et des Grisons, et l'équation (4.3) pour le reste des sites. Quant à la température maximale  $T_{s_{max,95\%}}$  pour une période de retour de 20 ans, elle a été déterminée en utilisant la formule (4.5).

Site	Région	Situation	Altitude
FR – Kleingurmels	Plateau occidental	Libre	558 m
FR – Montbovon	Plateau occidental	Cuvette	800 m
GR – Davos	Grisons	Cuvette	1550 m
GR – Grüşch	Grisons	Cuvette	600 m
GR – S-chanf	Grisons	Cuvette	1670 m
JU – Delémont	Jura	Libre	420 m
JU – St-Brais	Jura	Versant Sud	1000 m
VD – Lonay	Lac Léman	Libre	395 m
VS – Bovernier	Valais	Cuvette	600 m
VS – Monthey	Préalpes	Versant Est	490 m
ZH – Bertschikon	Plateau oriental	Libre	500 m

Tableau 23: Définition des régions et des situations des lieux de prélèvement

Site	Equation utilisée	Altitude [km]	Coefficients					$T_{s_{max}}$ [°C]	$sd_{max}$	$T_{s_{max,95\%}}$ [°C]
			a	b	c	d	l			
FR – Kleingurmels	(4.3)	0.558	-	-	-3.0	46.1	0.0	44.43	0.928	<b>46.07</b>
FR – Montbovon	(4.3)	0.800	-	-	-3.0	46.1	0.0	43.70	0.984	<b>45.44</b>
GR – Davos	(4.4)	1.550	-4.2	15.5	-19.6	51.8	-	43.02	0.872	<b>44.56</b>
GR – Grüşch	(4.4)	0.600	-4.2	15.5	-19.6	51.8	-	44.71	0.644	<b>45.85</b>
GR – S-chanf	(4.4)	1.670	-4.2	15.5	-19.6	51.8	-	42.74	0.901	<b>44.33</b>
JU – Delémont	(4.3)	0.420	-	-	-5.0	46.9	0.0	44.80	0.897	<b>46.39</b>
JU – St-Brais	(4.3)	1.000	-	-	-5.0	46.9	1,5	43.40	1.030	<b>45.22</b>
VD – Lonay	(4.3)	0.395	-	-	-3.0	46.1	0.0	44.91	0.891	<b>46.49</b>
VS – Bovernier	(4.4)	0.600	-5.9	26.1	-37.8	60.3	-	45.75	0.644	<b>46.88</b>
VS – Monthey	(4.3)	0.490	-	-	-3.0	46.1	0,0	44.63	0.618	<b>45.72</b>
ZH – Bertschikon	(4.3)	0.500	-	-	-3.0	46.1	0,0	44.60	0.915	<b>46.22</b>

Tableau 24: Calcul des températures maximales

## 5 Corrélations entre l'orniérage et les différents paramètres

### 5.1 Représentations graphiques entre T et les paramètres liés au matériau

Après avoir effectué toute l'étude expérimentale et déterminé plusieurs caractéristiques des matériaux composant les plaques prélevées, dont le point de ramollissement anneau et bille et la teneur en vides moyenne, les représentations graphiques suivantes ont pu être dressées entre la valeur de l'ornière in situ T et les valeurs issues de l'étude expérimentale:

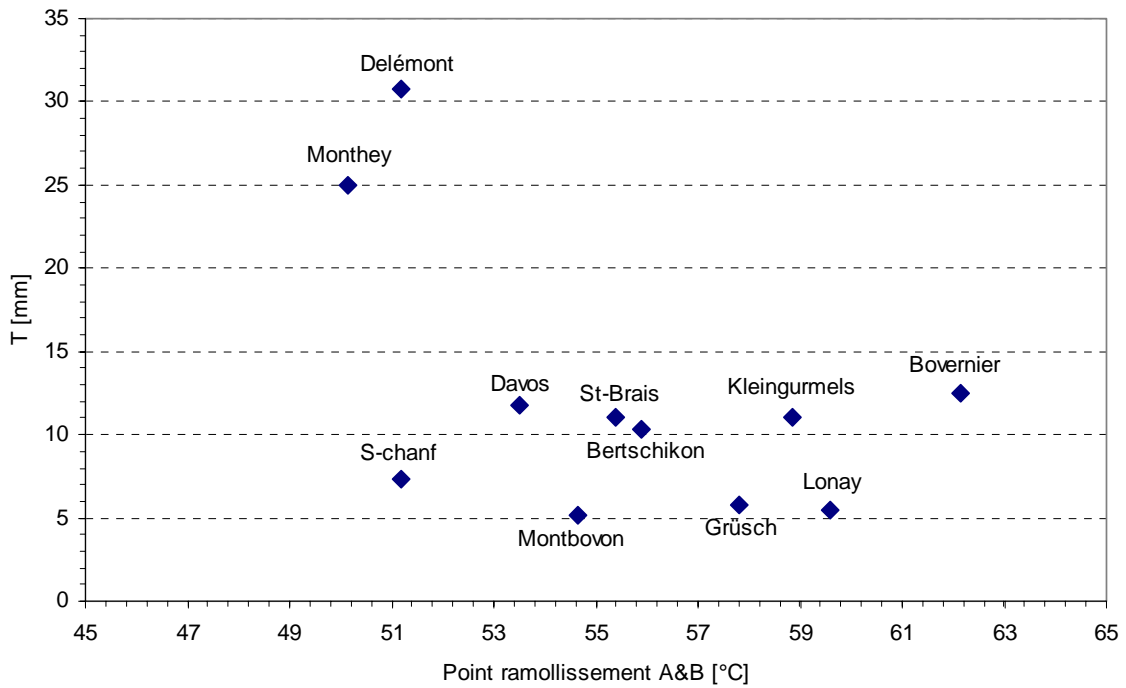


Figure 19: Représentation de T [mm] en fonction du point de ramollissement anneau et bille [°C].

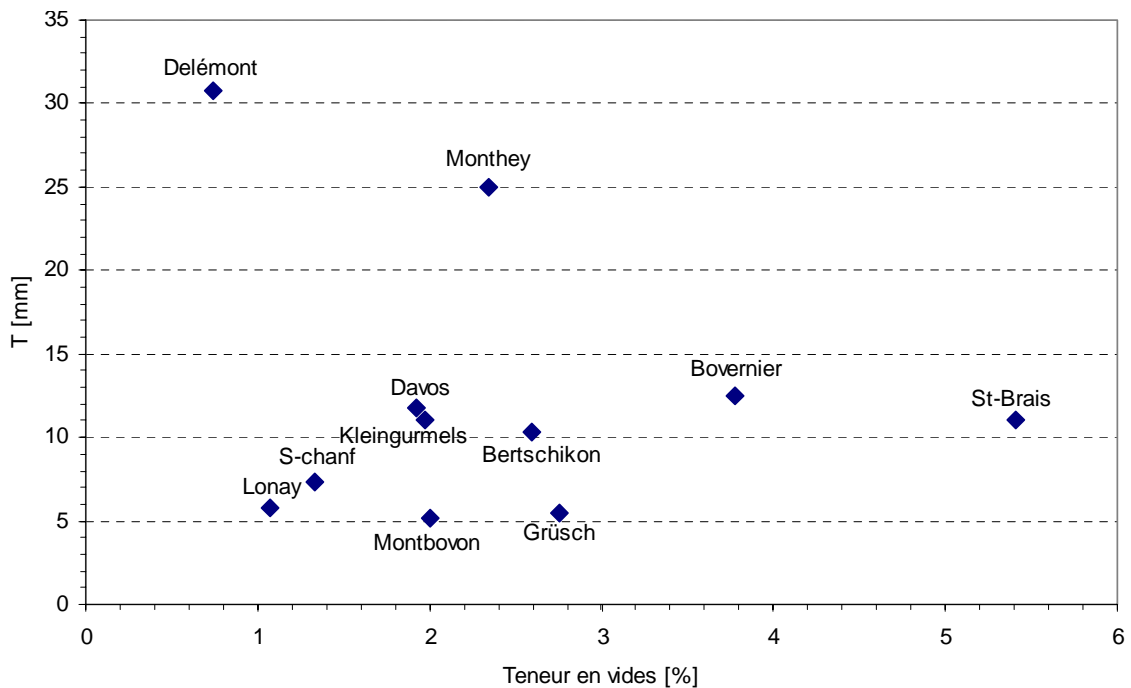


Figure 20: Représentation de T [mm] en fonction de la teneur en vides moyenne [%].

La tendance que l'on peut observer en Figure 19 est que les matériaux composant les chaussées les plus orniérées contiennent les bitumes les plus mous et possèdent une température de l'enrobé plus élevée à 2 cm de profondeur (voir Tableau 24). En effet, si la température du revêtement calculée selon la méthode développée par Angst [3] est élevée et la température du point de ramollissement anneau et bille est faible, on observe que l'orniérage est plus important.

Avec une tendance moins marquée que la figure précédente, la Figure 20 nous montre qu'en alliant une température de l'enrobé plus élevée, une vitesse des poids lourds plus basse (Tableau 18) ainsi qu'une teneur en vides plus faible, on obtient un matériau plus orniéré.

## 5.2 Représentations graphiques entre T et les paramètres liés au trafic

Des représentations graphiques similaires sont illustrées ci-après en considérant l'ornière in situ et les paramètres liés au trafic, à savoir la charge de trafic  $W$ , la vitesse des véhicules  $V$ .

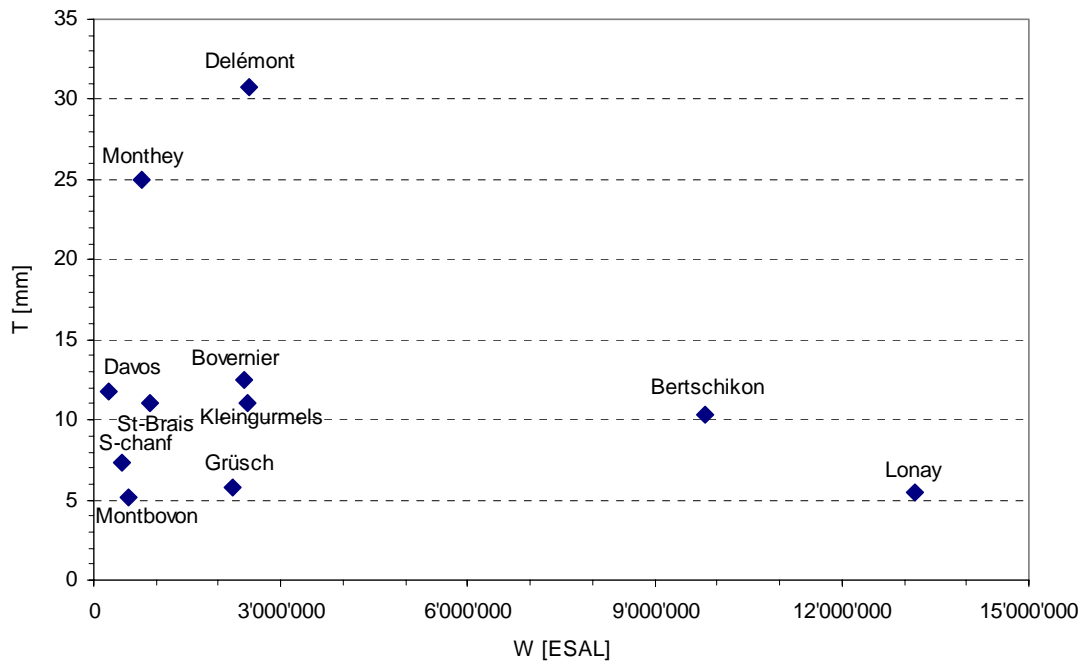


Figure 21: Représentation de  $T$  [mm] en fonction de la charge de trafic [ESAL].

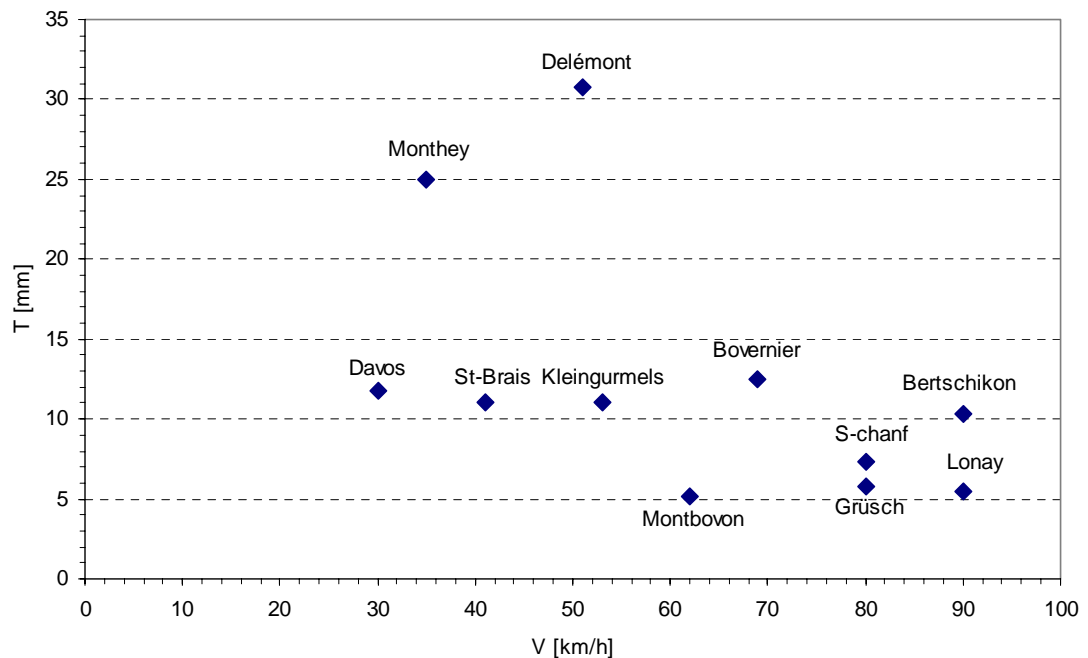


Figure 22: Représentation de  $T$  [mm] en fonction de la vitesse des véhicules [km/h].

La Figure 21 ne montre aucune corrélation claire entre la charge de trafic, exprimée en essieux équivalents, et la profondeur de l'ornière. Il peut y avoir des tronçons faiblement chargés par rapport aux autres et fortement orniérés (par exemple sur le site de Monthey) comme il peut y avoir des sites dont la

charge de trafic est élevée et qui ne présentent pas autant d'orniérage (par exemple à Bertschikon et à Lonay).

La Figure 22 ne présente pas de tendance claire entre la vitesse des poids lourds et la profondeur d'ornière. Néanmoins, on observe que pour la majorité des sites, une diminution de vitesse est généralement accompagnée d'une augmentation de la profondeur d'ornières.

### 5.3 Représentations graphiques entre T et la température

En ce qui concerne la corrélation entre la profondeur d'ornière et la température de l'enrobé à 2 cm de profondeur (d'après Angst [3]) elle est illustrée en Figure 23 pour chaque site.

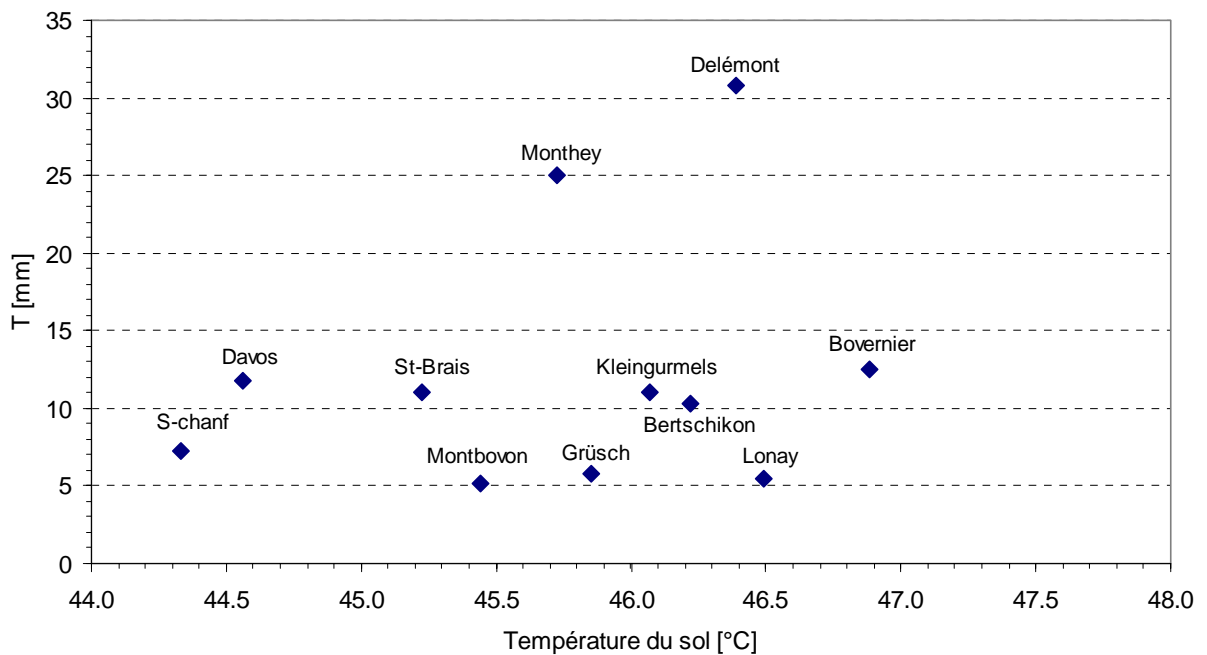


Figure 23: Représentation de T [mm] en fonction de la température du sol [°C] (selon [3]).

Dans la Figure 23, il n'y a rien susceptible d'indiquer qu'il existe une variation claire de la profondeur d'ornière uniquement en fonction de la température du sol à 2 cm de profondeur. En effet, les variations de température ne semblent pas avoir d'effet sur la profondeur d'ornière.

Finalement, on remarque que dans toutes ces représentations graphiques, rien ne permet de tirer des conclusions claires quant à de possibles corrélations entre l'ornière mesurée in situ et les caractéristiques des matériaux déterminés expérimentalement ou encore les paramètres liés au trafic et à la température.

De ce fait, il faut chercher à établir une méthode qui permette de relier la valeur d'ornière mesurée in situ aux différents paramètres qui interviennent dans la formation d'ornières, comme notamment la charge de trafic, la vitesse des véhicules et la température dans le revêtement.

## 6 Développement de la méthode de prédiction de l'orniérage

### 6.1 Introduction

Comme mentionné précédemment, les seuls paramètres correspondant aux propriétés des matériaux ne suffisent pas à décrire totalement le phénomène de l'orniérage. C'est pourquoi il faut tenir compte d'autres paramètres indépendants des matériaux, tels que la charge de trafic, la vitesse des véhicules et la température du site.

Dans le modèle développé ici, les seuls éléments nécessaires, qui dépendent du matériau, sont les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  issus de l'essai d'orniérage LPC en laboratoire.

La prédiction, à travers l'essai d'orniérage LPC, de l'évolution in situ de l'ornière d'un enrobé bitumineux, fait tout d'abord appel à l'équation empirique d'orniérage. L'équation empirique d'orniérage des enrobés bitumineux la plus utilisée a la forme suivante [5] [12] [22] [28]:

$$T = \alpha \cdot N^\beta \quad (6.1)$$

avec T: profondeur d'ornière [%]

N: nombre d'applications de charge (nombre d'essieux ou nombre de cycle lors de l'essai)

$\alpha$  et  $\beta$ : paramètres variant avec les propriétés du matériau

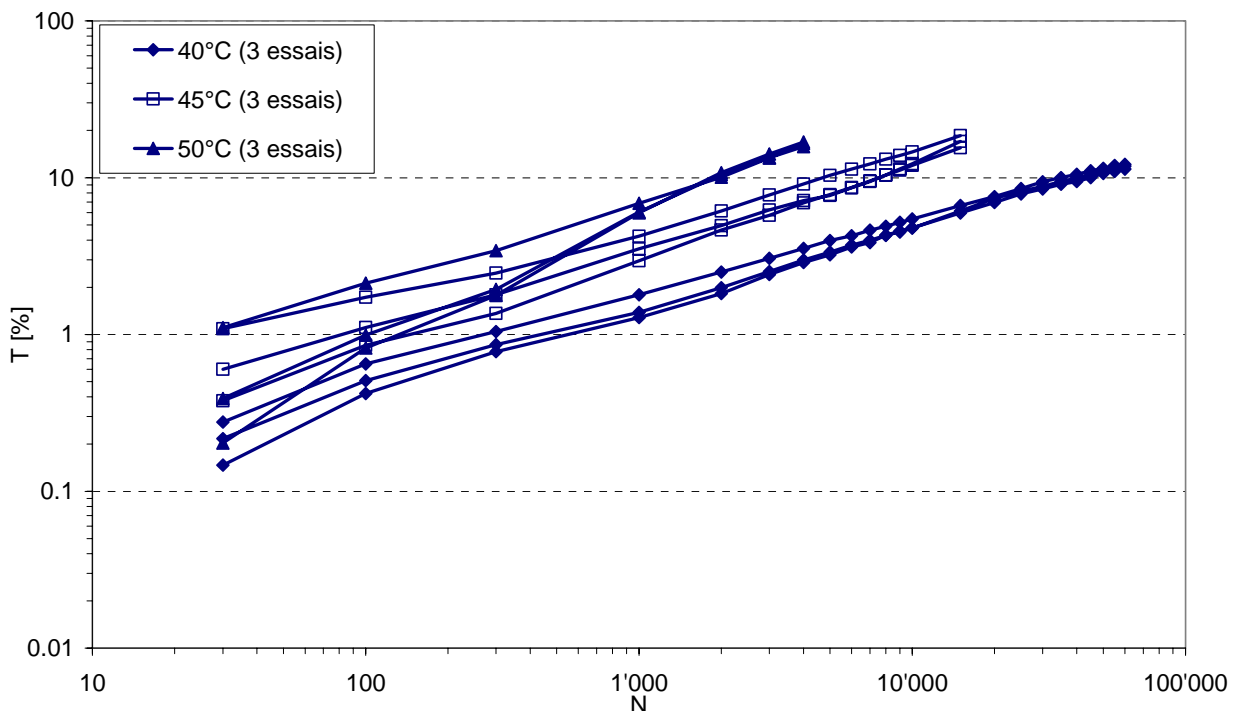


Figure 24: Exemple de courbe d'orniérage dans un système d'axes logarithmiques.

Dans un système d'axes logarithmiques, l'équation empirique d'orniérage (6.1) est représentée graphiquement par une droite où  $\alpha$  est l'ordonnée à l'origine et  $\beta$  la pente de la droite. On observe expérimentalement que cette droite devient plus régulière à partir de 1000 cycles. C'est pourquoi dans la norme [28], l'équation empirique (6.1) est transformée de telle sorte à avoir:



$$T = \alpha \cdot \left( \frac{N}{1000} \right)^\beta \quad (6.2)$$

où  $\alpha$  est cette fois la profondeur d'ornière à 1000 cycles et  $\beta$  la pente de la droite de régression en coordonnées logarithmiques. C'est donc cet  $\alpha$  auquel il sera fait référence pour toute la suite de l'étude.

Dans les équations (6.1) et (6.2), le nombre de cycles  $N$  correspond à une certaine charge et à une certaine vitesse de sollicitation imposées par la procédure d'essai normalisée [28] (voir la description de l'essai d'orniérage au chapitre 3.5). Cependant, dans la réalité, les charges et les vitesses appliquées sur les matériaux de chaussées sont variables. C'est pourquoi, pour tenir compte des variations de ces paramètres, l'application de certains coefficients de calage s'avère nécessaire. Il s'agit d'appliquer des coefficients de calage destinés à ajuster certains paramètres en fonction de leurs valeurs de référence.

Le concept général de la méthode présentée ici consiste à prendre comme point de départ l'équation générale d'orniérage (6.2) et de l'appliquer au phénomène d'orniérage qui se produit dans la réalité. Pour ce faire, trois hypothèses entrent en ligne de compte:

1. Le phénomène d'orniérage réel que subit la chaussée suit la même fonction que celui qui est observé en laboratoire [6]
2. Il n'y a pas d'orniérage structurel: l'orniérage se produit seulement dans le matériau bitumineux et non dans le sol
3. Il n'y a pas de gradient de température dans la couche d'enrobé bitumineux: la température est constante dans tout le matériau

Le modèle devrait permettre d'obtenir une valeur d'ornière en millimètres plutôt qu'en pourcentage de l'épaisseur de la couche comme pour l'essai en laboratoire. On commence par remplacer dans l'équation d'orniérage le nombre de cycles  $N$  appliqués en laboratoire par un nombre de "cycles équivalents"  $N_{eq}$  que l'on suppose être appliqués dans la réalité.

En tenant compte de cette modification et en transposant l'équation d'orniérage considérée dans les essais en laboratoire à la réalité, on obtient:

$$T = \alpha \cdot \left( \frac{N_{eq}}{1000} \right)^\beta \quad (6.3)$$

où  $T$  est la profondeur d'ornière [mm]

$N_{eq}$  est le nombre d'applications de charge observées dans la réalité

$\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres expérimentaux issus de l'essai d'orniérage en laboratoire

Comme l'application, dans la réalité, d'un certain nombre de cycles équivalents  $N_{eq}$  implique qu'ils sont dus à une certaine charge de trafic circulant à une certaine vitesse,  $N_{eq}$  englobe ces deux paramètres (trafic et vitesse) et contient les coefficients de calage relatifs à ces deux éléments. Il s'agit de  $C_W$  pour le trafic et  $C_V$  pour la vitesse et ils permettent de donner un ratio entre l'essai accéléré de laboratoire et le trafic dans la réalité. On pose donc que:

$$N_{eq} = f(W, C_W, C_V) \quad (6.4)$$

où  $N_{eq}$  est le nombre d'applications de charge observées dans la réalité

$W$  est le nombre d'essieux équivalents [ESAL]

$C_W$  est le coefficient de calage pour le trafic

$C_V$  est le coefficient de calage pour la vitesse

Parallèlement aux sollicitations mécaniques induites par le trafic (charge de trafic et vitesse des véhicules), la température du matériau a une importance non négligeable dans le phénomène d'orniérage. C'est pourquoi, la température observée dans l'environnement proche de la chaussée a été prise en compte dans le modèle. A nouveau il est possible de faire le parallèle entre les essais de laboratoire et la réalité. Les essais de laboratoire sont effectués à une certaine température, en général normalisée, tandis que, dans la réalité, la chaussée et son environnement subissent des variations de température parfois extrêmes. Un coefficient de calage de la température a été ajouté à l'équation générale de l'orniérage pour obtenir une formule du type:

$$T = C_\theta \cdot \alpha \cdot \left( \frac{N_{eq}}{1000} \right)^\beta \quad (6.5)$$

où  $C_\theta$  est le coefficient de calage de la température

L'équation finale du modèle devrait donc globalement avoir la forme de (6.5). Toutefois, à cette dernière équation s'ajoute encore un coefficient de calage  $\delta$ . Il sert à ajuster l'équation (6.5) pour approcher le modèle de prédiction théorique. Ainsi, le but recherché est que la valeur de l'ornière calculée par le modèle soit la plus proche possible de la valeur de l'ornière effectivement mesurée in situ.

$$T = C_\theta \cdot \alpha \cdot \left( \frac{N_{eq}}{1000} \right)^\beta + \delta \quad (6.6)$$

où  $\delta$  est un coefficient de calage par rapport au modèle idéal où  $T_{calculée} = T_{in situ}$

## 6.2 Paramètres liés aux matériaux

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  représentent respectivement la profondeur d'ornière à 1'000 cycles et la pente de la droite d'orniérage dans un système d'axes en coordonnées logarithmiques. Pour l'élaboration de la méthode, on a fait l'hypothèse que l'évolution de l'orniérage se fait de la même manière sur le terrain que durant l'essai en laboratoire [6]. L'équation empirique d'orniérage (6.2) a donc été considérée comme point de départ dans la méthode prédictive.

En ce qui concerne les essais d'orniérage effectués au LAVOC, dont les valeurs et les courbes peuvent être observées à l'annexe 10.3 et 10.4, une seule température est commune à tous les matériaux, celle de 50°C. Par souci d'homogénéité dans les résultats, la détermination des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  est celle qui correspond uniquement à cette température (Tableau 25).

Site	Température d'essai [°C]	$\alpha$	$\beta$
FR - Kleingurmels	50	1.936	0.4051
FR - Montbovon	50	3.251	0.3796
GR - Davos	50	4.468	0.5580
GR - Grüşch	50	1.818	0.3870
GR - S-chanf	50	4.608	0.6353
JU - Delémont	50	6.292	0.6943
JU - St Brais	50	2.106	0.2027
VD - Lonay	50	2.111	0.2925
VS - Bovernier	50	2.226	0.3997
VS - Monthey	50	5.816	0.7507
ZH - Bertschikon	50	2.820	0.5458

Tableau 25: Paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  pour les essais à 50°C

## 6.3 Paramètres liés au trafic

### 6.3.1 Charge de trafic

L'essai d'orniérage LPC fournit une profondeur d'ornière exprimée en fonction du nombre de cycles de charge et de deux paramètres propres au matériau testé ( $\alpha$  et  $\beta$ ). L'effet de chaque cycle de charge sur l'éprouvette dépend de l'importance de la charge qui est appliquée à l'essieu et de la vitesse qui lui est imposée.

Pour être en mesure de refléter le comportement réel de l'orniérage in situ et d'exprimer la profondeur d'ornière in situ en fonction de la charge de trafic, il faut transformer le nombre de cycles de charge  $N$  (obtenu de l'essai LPC) en nombre de "cycles équivalents"  $N_{eq}$  observés dans la réalité en faisant intervenir une estimation du nombre d'essieux équivalents totaux  $W$ , calculés selon [33], qui passeront sur la chaussée étudiée.

Pour effectuer cette transformation, on introduit une constante de trafic,  $C_w$ , dans la formule (6.6):

$$T = \alpha \left( \frac{C_w \cdot W}{1000} \right)^\beta + \delta \quad (6.7)$$

avec  $T$ : profondeur d'ornière [mm]

$\alpha$  et  $\beta$ : paramètres issus de l'essai d'orniérage

$W$ : nombre total d'essieux équivalents estimés qui passeront sur la chaussée étudiée [ESAL]

$C_w$  et  $\delta$ : constantes de calage destinées à maximiser la corrélation entre les ornières in situ et le résultat du calcul prédictif

Les constantes  $C_w$  et  $\delta$  ont pour but de caler le modèle prédictif sur la courbe représentant le modèle idéal, où l'ornière prédite correspondrait à l'ornière effectivement mesurée. Les valeurs déterminées qui fournissent de bonnes corrélations sont:

$$C_w = 5,128 \cdot 10^{-3} \quad (6.8)$$

$$\bar{\delta} = 4,9 \quad (6.9)$$

### 6.3.2 Vitesse des véhicules

La vitesse des véhicules a une grande influence sur l'évolution de l'orniéage d'une chaussée. En effet, plus la vitesse est faible et plus la durée de l'application de la charge agissant sur la chaussée sera longue. De par le caractère visqueux des enrobés bitumineux, plus la durée d'application de la charge est élevée et plus la déformation permanente sera importante.

Pour représenter et tenir compte de l'effet de la vitesse des véhicules dans le modèle, l'équation générale développée par Louis Francken [19] au Centre de Recherches Routières (CRR) a été utilisée. Il nous donne une formule pour calculer la déformation permanente en fonction des contraintes, du nombre de cycles de charge, de la vitesse et du module de déformation plastique  $E_p$  dépendant des caractéristiques des matériaux qui composent l'enrobé bitumineux:

$$\varepsilon_p = (\sigma_v - \sigma_h) \cdot \left( \frac{N}{450 \cdot V} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{2 \cdot E_p} \quad (6.10)$$

avec  $\varepsilon_p$  : déformation permanente

$\sigma_v$  : contrainte verticale

$\sigma_h$  : contrainte horizontale

$N$  : nombre de cycles

$V$  : vitesse des véhicules [km/h]

$E_p$  : module dépendant des composants de l'enrobé bitumineux

Les caractéristiques d'un enrobé standard sont introduites pour calculer les valeurs de modules de déformation plastique  $E_p$  pour des températures allant de  $-20^\circ\text{C}$  à  $40^\circ\text{C}$  et des vitesses allant de 10 km/h à 100 km/h. En fixant la température de référence à  $50^\circ\text{C}$  de telle manière à satisfaire la valeur d'essai commune à tous les matériaux ( $50^\circ\text{C}$ ), on est en mesure de déterminer un coefficient de calage ( $C_v$ ) pour les vitesses par rapport à la vitesse de référence prise ici égale à 50 km/h.

Pour rapporter tous les résultats à la vitesse de référence de 50 km/h et ainsi obtenir le coefficient de vitesse  $C_v$  qui sera introduit dans le modèle prédictif de calcul des ornières, il faut appliquer la formule (6.12), issue de l'équation (6.10) avec  $V_{ref}=50\text{km/h}$ . En effet, en supposant un état de contrainte et de déformation constant sur toute l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux subissant l'orniéage, on peut considérer que la profondeur d'ornière, donnée en millimètres, est égale à la déformation adimensionnelle de la couche de chaussée considérée multipliée par l'épaisseur de la couche:

$$T = \varepsilon_p \cdot h \quad (6.11)$$

avec  $T$  : profondeur d'ornière [mm]

$\varepsilon_p$  : déformation permanente [-]

$h$  : épaisseur de la couche considérée [mm]

Pour rapporter la profondeur d'ornière, en fonction d'une certaine vitesse, à une valeur d'ornière en fonction de la vitesse de référence ( $V_{ref}=50$  km/h), on pose l'égalité (6.12) et (6.13):

$$C_V = \frac{T(V)}{T(V_{ref})} = \frac{\varepsilon_{p(V)} \cdot h}{\varepsilon_{p(V_{ref})} \cdot h} = \left( \frac{V_{ref}}{V} \right)^{0,25} \cdot \frac{E_{p(V_{ref})}}{E_{p(V)}} \quad (6.12)$$

et donc

$$C_V = \frac{T(V)}{T(50)} = \left( \frac{50}{V} \right)^{0,25} \cdot \frac{E_{p(50)}}{E_{p(V)}} \quad (6.13)$$

avec  $T(V)$ : ornière en fonction d'une vitesse quelconque [mm]

$T(50)$ : ornière en fonction de la vitesse de référence ( $V_{ref}=50$  km/h) [mm]

$V$ : vitesse des véhicules [km/h]

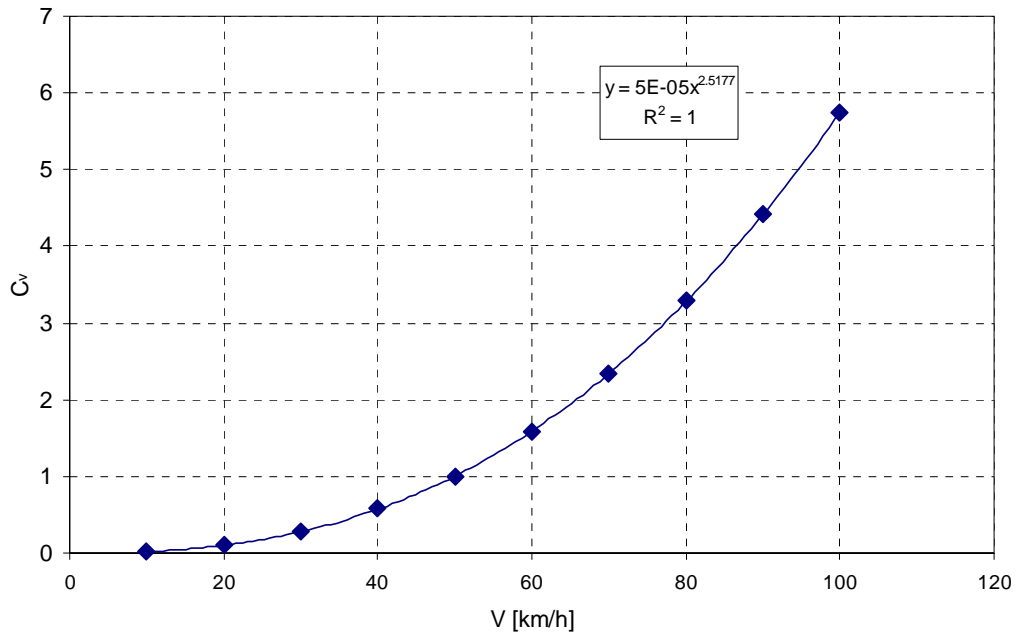
$E_{p(V)}$ : module plastique donné en fonction de la vitesse (pour  $\theta=50^\circ\text{C}$ )

$E_{p(50)}$ : module plastique donné pour la vitesse de référence (pour  $\theta=50^\circ\text{C}$ )

Le coefficient de vitesse  $C_V$ , calculé selon l'équation (6.13) pour chaque vitesse dans une fourchette allant de 10 à 100 km/h, est représenté à la Figure 25. On observe qu'il a la forme d'une fonction puissance, variable dépendant de la vitesse:

$$C_V = 5 \cdot 10^{-5} \cdot V^{2,5177} \quad (6.14)$$

où  $V$  est la vitesse donnée en km/h

Figure 25: Coefficient de vitesse C<sub>v</sub>

Pour tenir compte de l'effet de la vitesse dans le calcul de la profondeur des ornières, l'équation (6.6) devient:

$$T = \alpha \cdot \left( \frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^\beta + \delta \quad (6.15)$$

avec T: profondeur d'ornière [mm]

$\alpha$  et  $\beta$ : paramètres issus de l'essai d'orniérage

W: nombre total d'essieux équivalents estimés qui passeront sur la chaussée étudiée [ESAL]

$C_w$  et  $\delta$ : constantes obtenues en maximisant la corrélation entre les ornières in situ et le résultat du calcul prédictif

$C_v$ : coefficient de calage pour la vitesse

#### 6.4 Paramètre lié à l'environnement du site

Comme pour la détermination du coefficient de vitesse, le coefficient de calage pour la température  $C_\theta$  est obtenu en rapportant la valeur de l'ornière à une certaine température à la valeur de l'ornière à la température de référence de  $\theta = 50^\circ\text{C}$ . En reprenant les équations (6.10), (6.11) et (6.12) comme base, on obtient:

$$C_\theta = \frac{T(\theta)}{T(\theta_{\text{ref}})} = \frac{\varepsilon_{p(\theta)} \cdot h}{\varepsilon_{p(\theta_{\text{ref}})} \cdot h} = \frac{E_{p(\theta_{\text{ref}})}}{E_{p(\theta)}} = \frac{E_{p(50)}}{E_{p(\theta)}} \quad (6.16)$$

avec  $T(\theta)$ : ornière en fonction d'une température quelconque [mm]

$T(\theta_{ref})$ : ornière en fonction de la température de référence ( $\theta_{ref}=50$  km/h) [mm]

$\theta$ : température du site [°C]

$E_{p(\theta)}$ : module donné dans la matrice en fonction de la température

$E_{p(50)}$ : module donné en fonction de la température de référence

En représentant graphiquement le coefficient  $C_\theta$  en fonction d'un éventail de températures allant de 10°C à 50°C, on remarque qu'il suit une fonction exponentielle de la forme (Figure 26)

$$C_\theta = A \cdot e^{B(\theta - \theta_{ref})} \quad (6.17)$$

où A et B sont des constantes

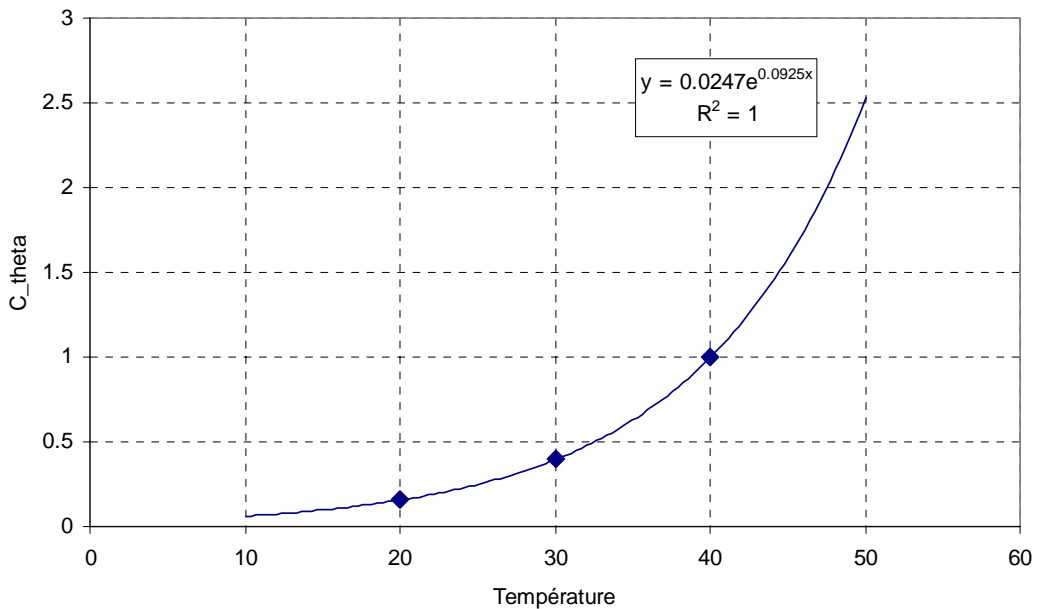


Figure 26: Coefficient de température  $C_\theta$

Par définition, la température de référence est celle pour laquelle aucune correction n'est nécessaire dans le modèle. Par conséquent, pour caler le modèle, on admet que  $C_\theta=1$  lorsque la température est égale à la température de référence ( $\theta=\theta_{ref}=50^\circ\text{C}$ ):

$$C_\theta = A \cdot e^{B(\theta - \theta_{ref})} = 1 \quad (6.18)$$

$$C_\theta = A \cdot e^{B(50 - 50)} = 1 \quad (6.19)$$

$$C_\theta = A = 1 \quad (6.20)$$

Au vu de (6.20), on corrige la fonction exponentielle (6.17) obtenue initialement, de telle manière à ce qu'elle satisfasse (6.21)

$$C_{\theta} = e^{B(\theta - \theta_{ref})} \quad (6.21)$$

où les constantes valent  $B = \frac{1}{10,8}$  et  $\theta_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$

Finalement, on obtient un coefficient de calage  $C_{\theta}$  variable en fonction de la température, qui vaut:

$$C_{\theta} = e^{\frac{\theta - 50}{10,8}} \quad (6.22)$$

Avec la détermination de ce dernier coefficient, l'équation finale du modèle devient:

$$T = C_{\theta} \cdot \alpha \left( \frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^{\beta} + \delta \quad (6.23)$$

avec T: profondeur d'ornière [mm]

$\alpha$  et  $\beta$ : paramètres issus de l'essai d'orniérage

W: nombre total d'essieux équivalents estimés qui passeront sur la chaussée étudiée [ESAL]

$C_w$  et  $\delta$ : constantes obtenues en maximisant la corrélation entre les ornières in situ et le résultat du calcul prédictif

$C_v$ : coefficient de calage pour la vitesse

$C_{\theta}$  coefficient de calage pour la température

## 6.5 Calcul prédictif des ornières

Dans l'idéal, la valeur de l'ornière estimée par le modèle devrait avoir la même valeur que l'ornière effectivement mesurée dans la réalité. Il s'agirait donc d'une courbe de la forme  $y=x$  (voir Figure 28).

Dans le but de trouver un modèle prédictif de l'orniérage, l'équation empirique d'orniérage a été considérée comme étant la base du développement. Il a fallu passer d'une équation déterminée expérimentalement à une équation similaire qui puisse satisfaire les conditions rencontrées in situ.

En utilisant l'équation finale du modèle prédictif (6.23) et en introduisant toutes les valeurs déterminées pour les différents sites, il est possible d'obtenir une valeur d'ornière estimée à plus ou moins long terme. Dans le Tableau 26 figurent toutes les données utilisées pour l'élaboration du modèle ainsi que les valeurs d'ornières mesurées in situ et les valeurs d'ornières calculées en utilisant (6.23). La différence entre les valeurs d'ornières mesurées et calculées peut s'apprécier sur la Figure 27.



Site	Caractéristiques du matériau		Caractéristiques du site			Ornières	
	$\alpha$	$\beta$	W [ESAL]	V [km/h]	$\Theta$ [°C]	T in situ [mm]	T calculée [mm]
FR - Kleingurmels	1.936	0.4051	2'464'813	53	46.07	11.0	8.79
FR - Montbovon	3.251	0.3796	569'422	62	45.44	5.2	7.78
GR - Davos	4.468	0.5580	240'425	30	44.56	11.8	10.50
GR - Grüşch	1.818	0.3870	2'212'906	80	45.85	5.8	7.14
GR - S-chanf	4.608	0.6353	458'403	80	44.33	7.3	8.05
JU - Delémont	6.292	0.6943	2'051'390	51	46.39	30.8	30.04
JU - St Brais	2.106	0.2027	894'259	41	45.22	11.0	7.14
VD - Lonay	2.111	0.2925	13'172'339	90	46.49	5.5	8.30
VS - Bovernier	2.226	0.3997	2'407'905	69	46.88	12.5	8.52
VS - Monthey	5.816	0.7507	765'121	35	45.72	25.0	29.32
ZH - Bertschikon	2.820	0.5458	9'808'574	90	46.22	10.3	12.13

Tableau 26: Tableau récapitulatif des caractéristiques prises en compte.

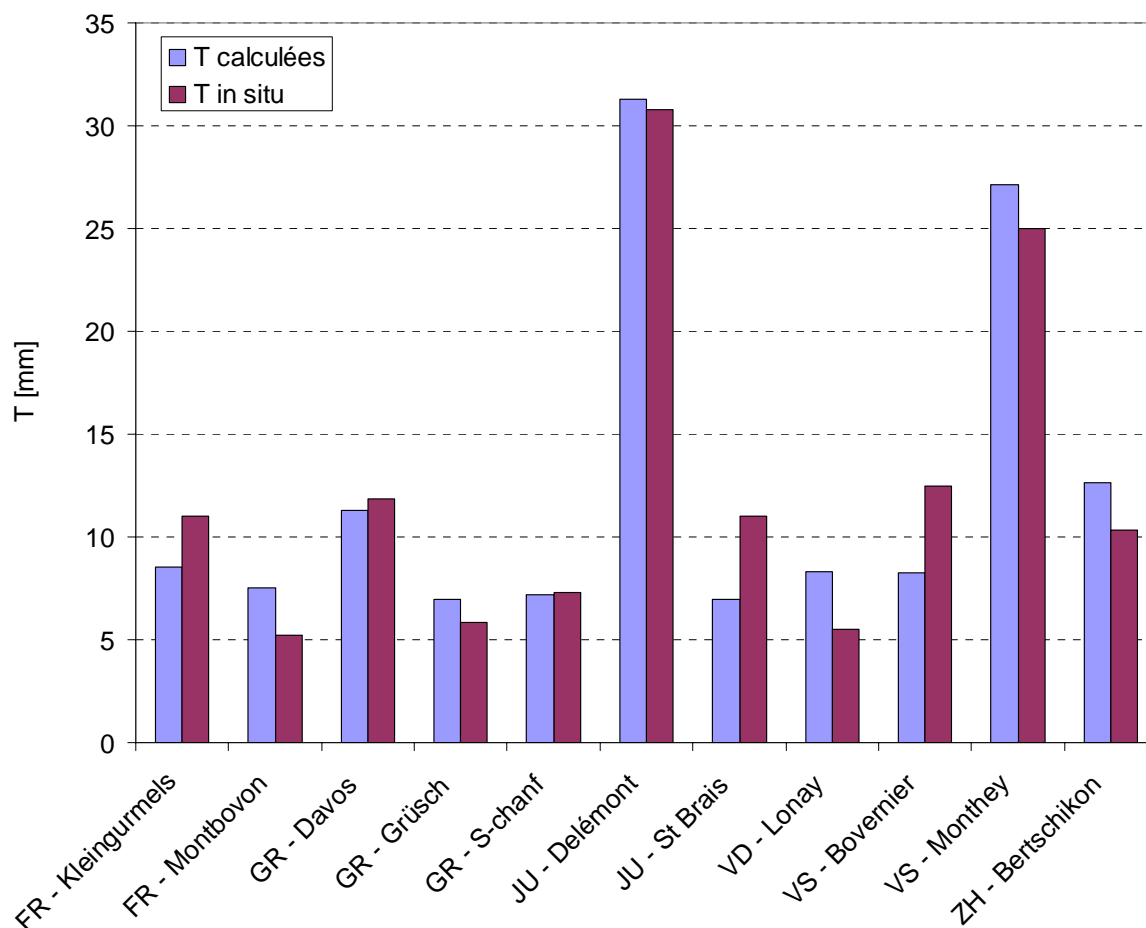


Figure 27: Valeur des ornières calculées et effectives pour tous les sites.

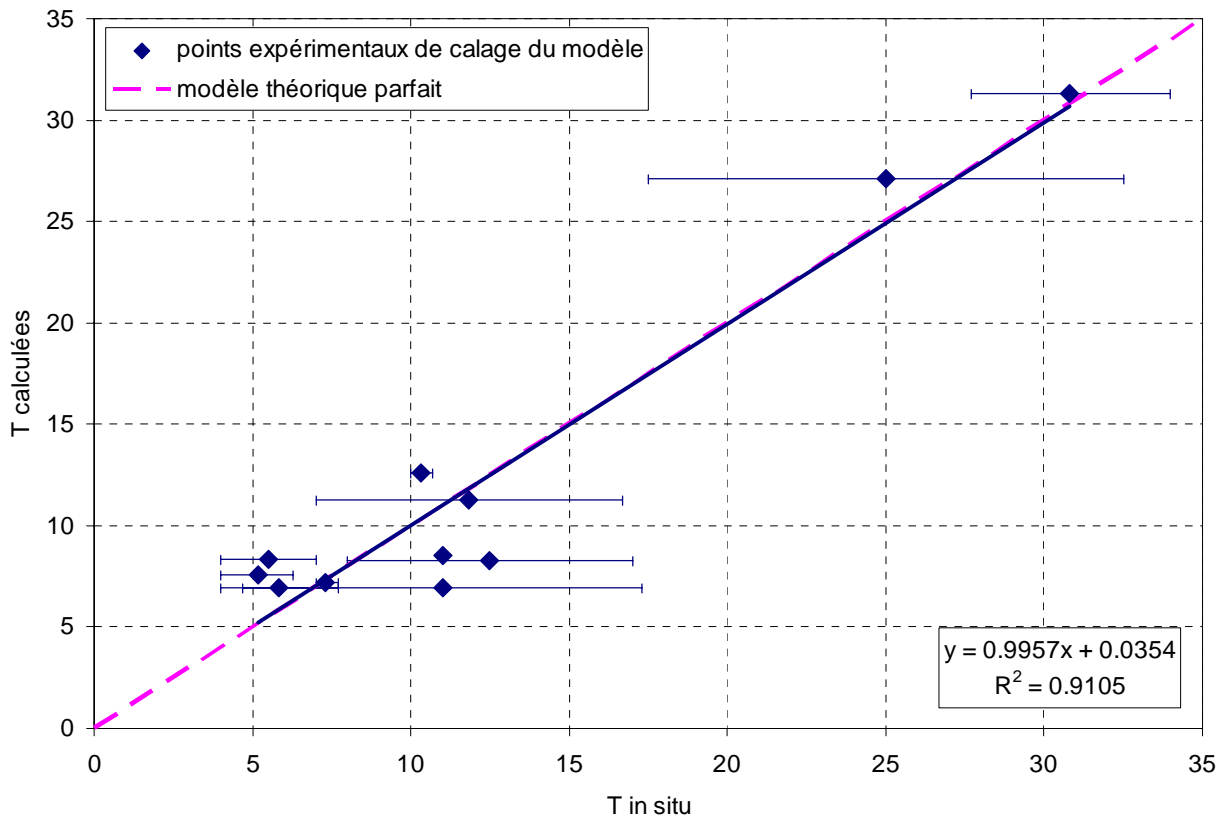


Figure 28: Relation entre les ornières calculées et les ornières mesurées.

La Figure 28 illustre la relation entre les valeurs d'ornières calculées avec (6.23) et les profondeurs d'ornières effectivement mesurées sur les onze sites répertoriés au Tableau 26. Les points représentent des valeurs moyennes entre l'ornière mesurée à gauche et celle de droite. Les barres horizontales indiquent les valeurs minimales et maximales des ornières mesurées sur chaque site.

La relation entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs de mesure représente une droite dont le coefficient de corrélation est égal à  $R^2=0,91$ . L'équation (6.23) du modèle prédictif semble a priori être une bonne méthode pour estimer la valeur de l'ornière sur n'importe quel matériau de chaussée, uniquement à partir d'un essai au simulateur de trafic LPC.

## 6.6 Marche à suivre de la méthode

Pour appliquer la nouvelle procédure de prédiction de l'orniérage, il faut passer par les quatre étapes décrites ci-dessous.

### - Etape 1:

Faire un essai d'orniérage à l'aide de l'orniéreur LPC (selon [28]) du matériau considéré et destiné à être mis en place (ou déjà en place), puis déterminer les coefficients expérimentaux  $\alpha$  et  $\beta$ .

### - Etape 2:

Déterminer la charge de trafic équivalent total  $W$ , exprimée en essieux équivalents [ESAL], prévue durant toute la période de service du tronçon de chaussée considéré.

>> outils d'aide: - Norme SN 640 320a

- données de comptage de trafic disponibles

Une fois que la charge de trafic totale est calculée, il faut l'intégrer dans l'équation d'orniérage en faisant intervenir un coefficient de calage pour le trafic  $C_w$  dont la valeur est constante:

$$C_w = 5,128 \cdot 10^{-3}$$

**- Etape 3:**

Déterminer la vitesse effective moyenne des véhicules lourds (>3.5 t) prévue sur le tronçon de chaussée considéré.

>> outils d'aide: - Norme SN 640 138a

- éventuellement mesures de vitesse sur place s'il s'agit d'une chaussée existante

La vitesse doit être liée à l'équation d'orniérage en introduisant un coefficient de calage pour la vitesse  $C_v$  variable en fonction de la vitesse. Lorsque la vitesse moyenne est connue ou estimée, et pour connaître la valeur de  $C_v$ , on l'introduit dans l'équation:

$$C_v = 5 \cdot 10^{-5} \cdot V^{2,5177}$$

**- Etape 4:**

Déterminer la température maximale pour une période de retour de 20 ans selon la méthode décrite par Angst et al. [3].

>> outils d'aide: - Méthode décrite dans [3]

Pour lier la température à l'équation d'orniérage, il faut calculer un coefficient de calage pour la température  $C_\theta$ , variable en fonction de la température. Il est égal à:

$$C_\theta = e^{\frac{\theta-50}{10.8}}$$

## - Résumé:

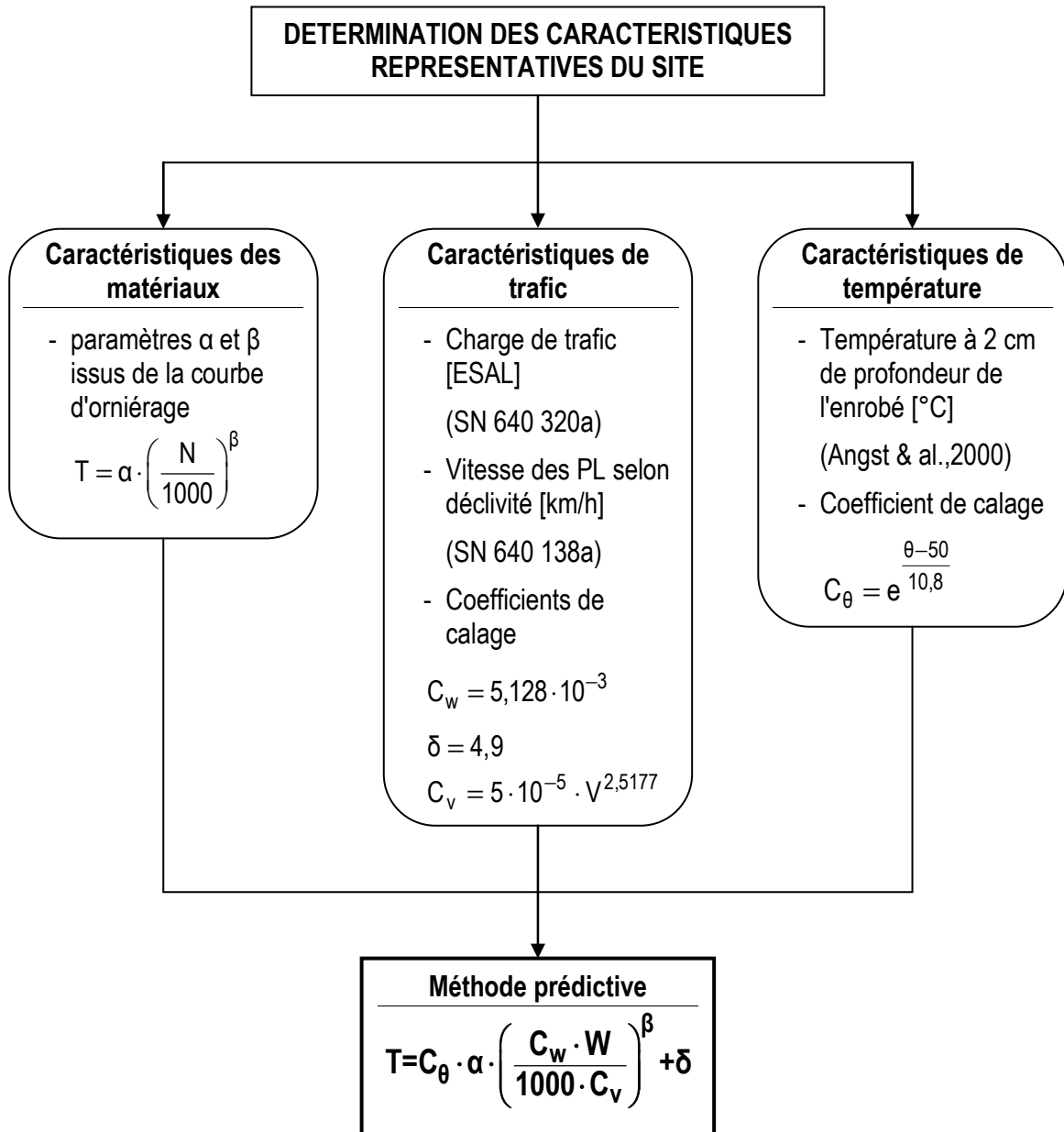


Figure 29: Organigramme pour l'application de la méthode de prédiction de l'orniérage.

## 7 Vérification de la méthode et exemple d'application

### 7.1 Matériaux analysés

Pour vérifier et valider le modèle, quatre matériaux supplémentaires ont été analysés. Ces matériaux sont indépendants des matériaux pris en compte au départ pour la calibration du modèle, et ne sont donc pas entrés en ligne de compte dans son élaboration.

Site	Type d'enrobé	Durée de mise en service	$\alpha$	$\beta$	T_gauche [mm]	T_droite [mm]	T_moy. [mm]
1	AB 25us	7 ans	4,1	0,74	20	10	15,0
2	AB 25us	7 ans	2,2	0,59	15	3,8	9,4
3	AB 25us	7 ans	1,4	0,47	10	8,8	9,4
4	SMA 11s	4 ans	8,1	0,74	19	17,5	18,3

Tableau 27: Caractérisation des matériaux de vérification

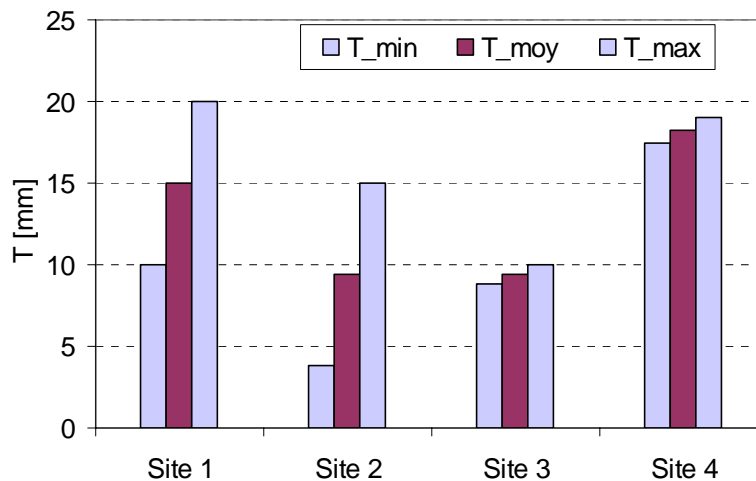


Figure 30: Mesure des ornières in situ (min, max, moyenne).

### 7.2 Trafic déterminant

Le calcul du trafic déterminant se fait en adoptant un taux d'accroissement annuel constant du trafic journalier moyen en appliquant l'équation (4.1).

$$TF_n = \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot n} \cdot TF_0$$

avec  $TF_n$  : trafic pondéral équivalent journalier calculé

$TF_0$  : trafic pondéral équivalent journalier de référence

$r$  : taux d'accroissement annuel [-]

$n$  : durée d'utilisation totale considérée [années]

Puisque des comptages de trafic ne sont pas disponibles pour toutes les années de mise en service de ces chaussées et que ce sont des données nécessaires pour le calcul de la charge de trafic totale, des données ponctuelles ont été relevées dans les brochures éditées par l'Office Fédéral des Routes (OFROU). Ces données font état du trafic journalier moyen (TJM) et du pourcentage de poids lourds (%PL). Le pourcentage de poids lourds considéré pour chaque site est une moyenne de trois valeurs relevées tous les cinq ans par l'OFROU.

Pour calculer le trafic pondéral équivalent total  $W$ , on applique la formule (4.2) pour chaque année de mise en service de la route.

$$W = k \cdot f_v \cdot 365 \sum_{i=1}^n \text{TJM}_i \cdot \% \text{PL}_i$$

avec  $W$ : trafic pondéral équivalent total

$\text{TJM}_i$ : trafic journalier moyen

%PL: pourcentage de poids lourds

$k$ : facteur d'équivalence moyen du trafic lourd selon le type de route

$f_v$ : coefficient de répartition du trafic en fonction du nombre de voies

$n$ : nombre total d'années d'utilisation de la chaussée

### 7.2.1 Site 1

- Détermination du pourcentage PL moyen sur 10 ans à partir de données de 1985, 1990 et 1995:

Année	TJM total	TJM PL	%PL
1985	14.500	1.700	11,72%
1990	17.500	1.910	10,91%
1995	24.300	3.010	12,39%
		moyenne	<b>11,68%</b>

Tableau 28: Calcul du pourcentage PL moyen (site 1)

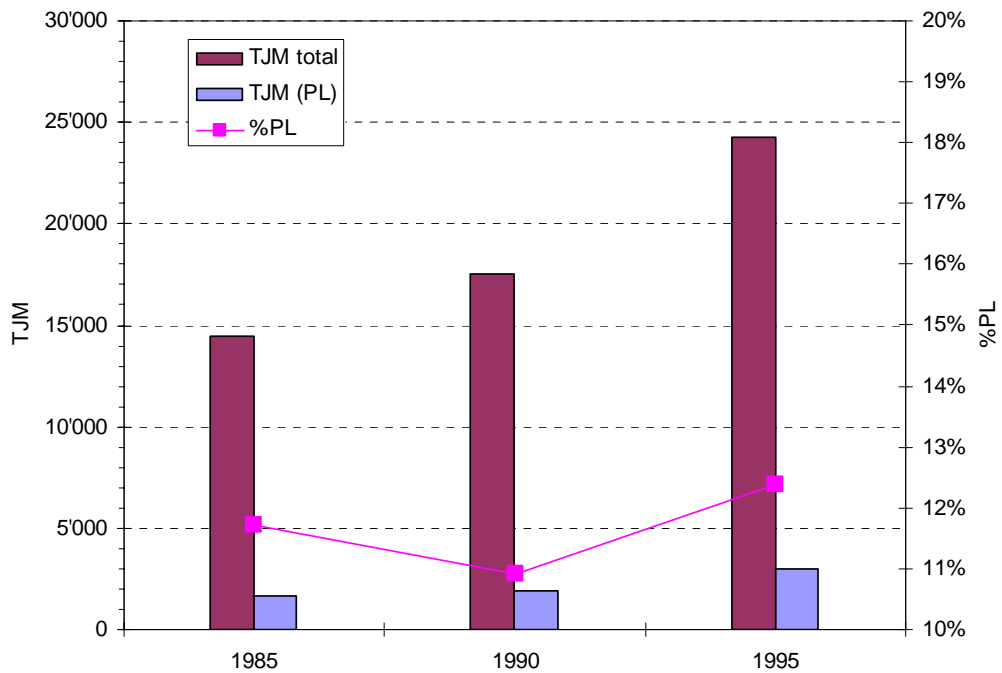


Figure 31: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL (site 1)

- Détermination du trafic pondéral équivalent total W sur 7 ans avec un taux d'accroissement annuel  $r=9,90\%$ :

Pourcentage PL: 11,68%  
 Trafic en f(nbre. de voies) fv: 45%  
 Facteur d'équivalence moyen k: 1,30

Année	TJM*	W [ESAL]**
1985	14.500	361.474
1986	<i>15.318</i>	381.871
1987	<i>16.171</i>	403.131
1988	<i>17.059</i>	425.270
1989	<i>17.983</i>	448.301
1990	17.500	436.261
1991	<i>19.940</i>	497.085
1992	<i>20.974</i>	522.858
1993	22.400	558.415
1994	23.500	585.837
1995	24.300	605.780
<b>Total</b>		<b>3.654.537</b>

\*valeurs en italique calculées selon la norme SN 640 320a

\*\*le trafic total est égal à la somme des cellules grisées

Tableau 29: Trafic pondéral équivalent total (site 1)

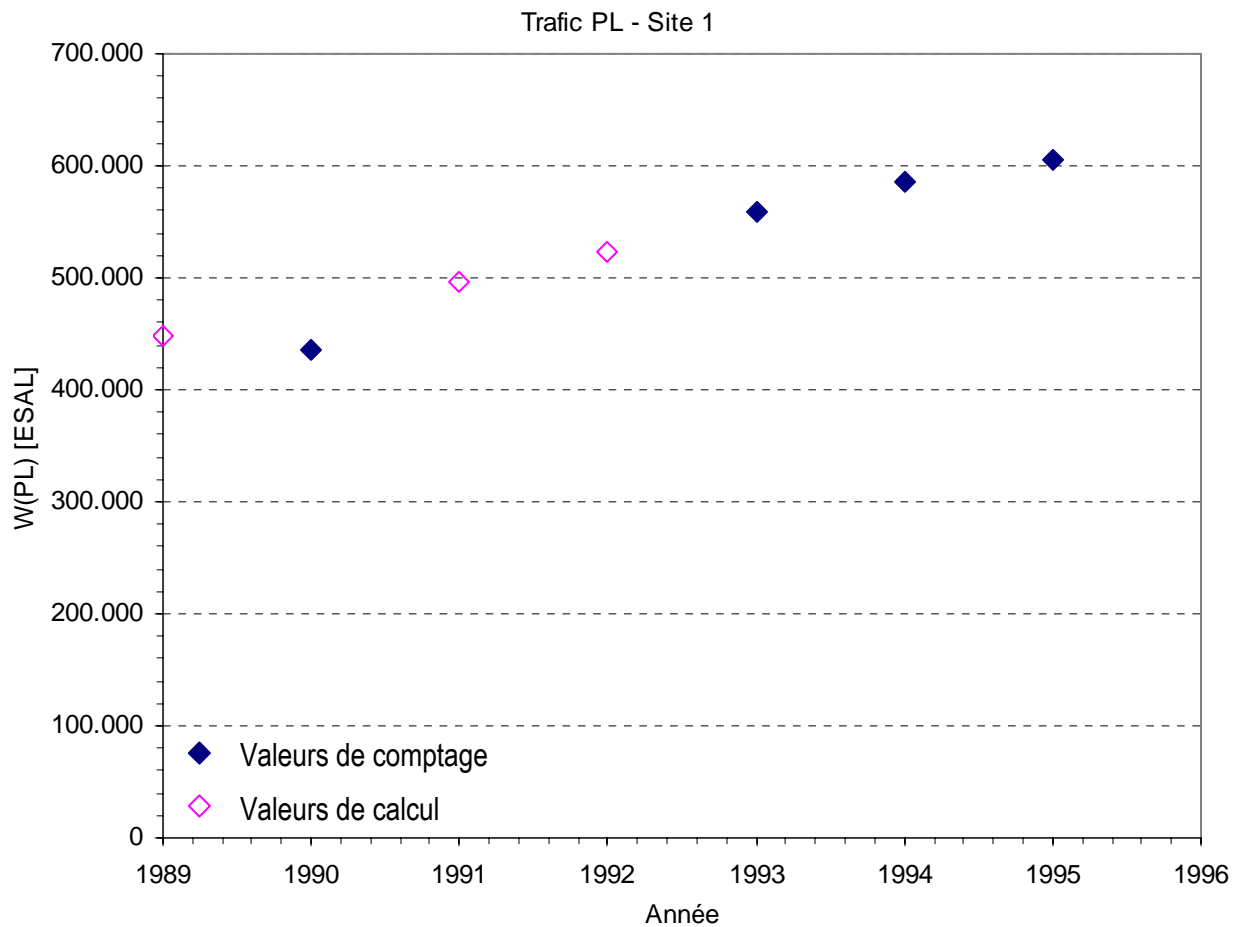


Figure 32: Trafic équivalent total sur le site 1.

### 7.2.2 Sites 2 et 3

- Détermination du pourcentage PL moyen sur 10 ans à partir de données de 1985, 1990 et 1995:

Année	TJM total	TJM PL	%PL
1985	10.300	1.400	13,59%
1990	15.900	1.960	12,33%
1995	20.800	2.990	14,38%
		moyenne	<b>13,43%</b>

Tableau 30: Calcul du pourcentage PL moyen (sites 2 et 3)



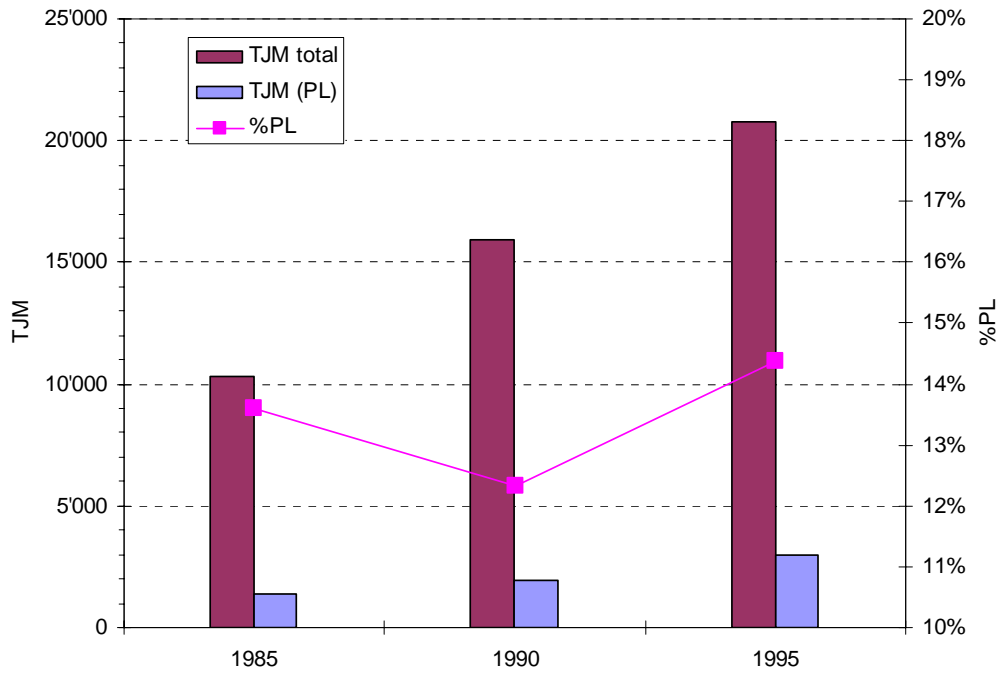


Figure 33: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL (sites 2 et 3)

- Détermination du trafic pondéral équivalent total W sur 7 ans avec un taux d'accroissement annuel  $r=13,33\%$ :

Pourcentage PL: 13,43%  
 Trafic en f(nbre. de voies) fv: 45%  
 Facteur d'équivalence moyen k: 1,30

Année	TJM*	W [ESAL]**
1985	10.300	295.398
1986	<i>11.112</i>	318.691
1987	<i>11.974</i>	343.405
1988	<i>12.887</i>	369.581
1989	<i>13.852</i>	397.258
1990	15.900	456.003
1991	<i>15.944</i>	457.255
1992	<i>17.073</i>	489.632
1993	<i>18.258</i>	523.626
1994	20.200	579.325
1995	20.800	596.533
<b>Total</b>		<b>3.499.632</b>

\*valeurs en italique calculées selon la norme SN 640 320a

\*\*le trafic total est égal à la somme des cellules grisées

Tableau 31: Trafic équivalent total (sites 2 et 3)

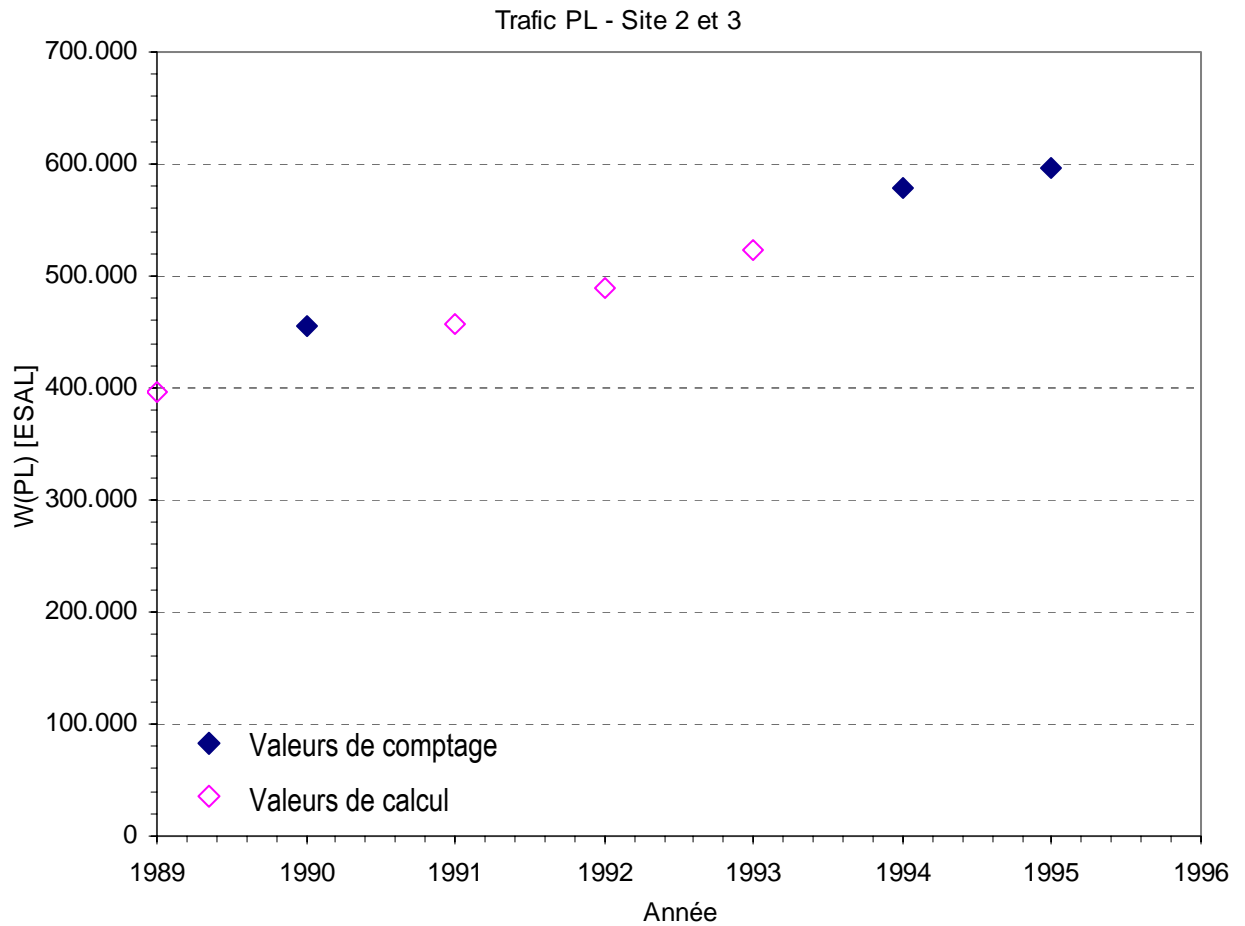


Figure 34: Trafic équivalent total sur les sites 2 et 3.

### 7.2.3 Site 4

- Détermination du pourcentage PL moyen sur 10 ans à partir de données de 1985, 1990 et 1995:

Année	TJM total	TJM PL	%PL
1985	10.300	1.400	13,59%
1990	15.900	1.960	12,33%
1995	20.800	2.990	14,38%
		moyenne	<b>13,43%</b>

Tableau 32: Calcul du pourcentage PL moyen (site 4)

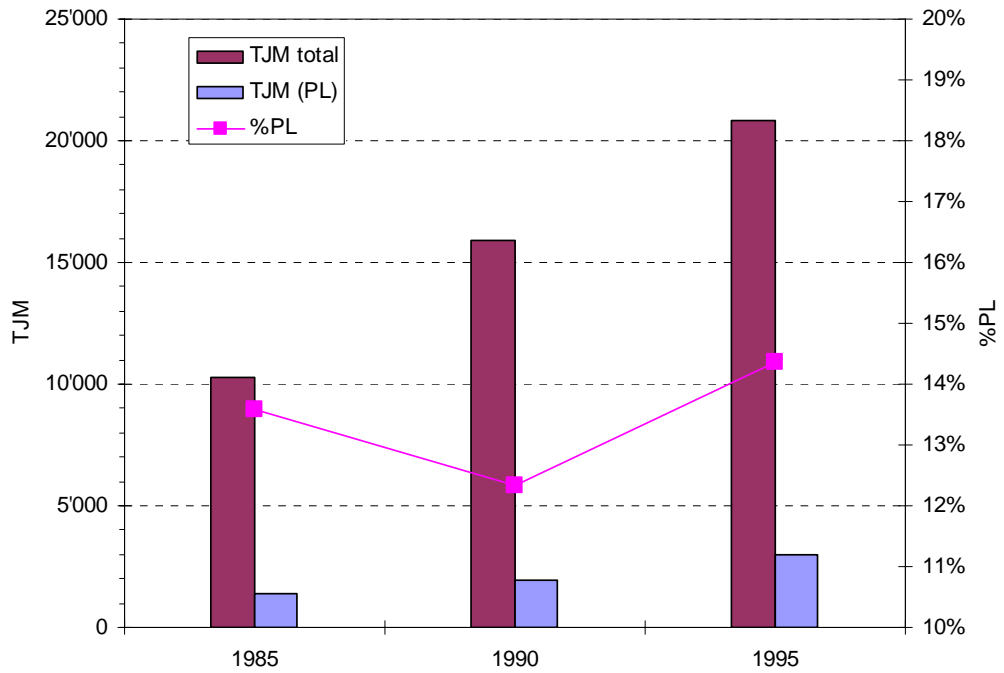


Figure 35: Données du TJM (total et PL) et détermination du %PL

- Détermination du trafic pondéral équivalent total W sur 7 ans avec un taux d'accroissement annuel  $r=13,33\%$ :

Pourcentage PL: 13,43%  
 Trafic en f(nbre. de voies) fv: 45%  
 Facteur d'équivalence moyen k: 1,30

Année	TJM*	W [ESAL]**
1985	10.300	295.398
1986	<i>11.112</i>	318.691
1987	<i>11.974</i>	343.405
1988	<i>12.887</i>	369.581
1989	<i>13.852</i>	397.258
1990	15.900	456.003
1991	<i>15.944</i>	457.255
1992	<i>17.073</i>	489.632
1993	<i>18.258</i>	523.626
1994	20.200	579.325
1995	20.800	596.533
<b>Total</b>		<b>2.189.115</b>

\*valeurs en italique calculées selon la norme SN 640 320a

\*\*le trafic total est égal à la somme des cellules grisées

Tableau 33: Trafic équivalent total (site 4)

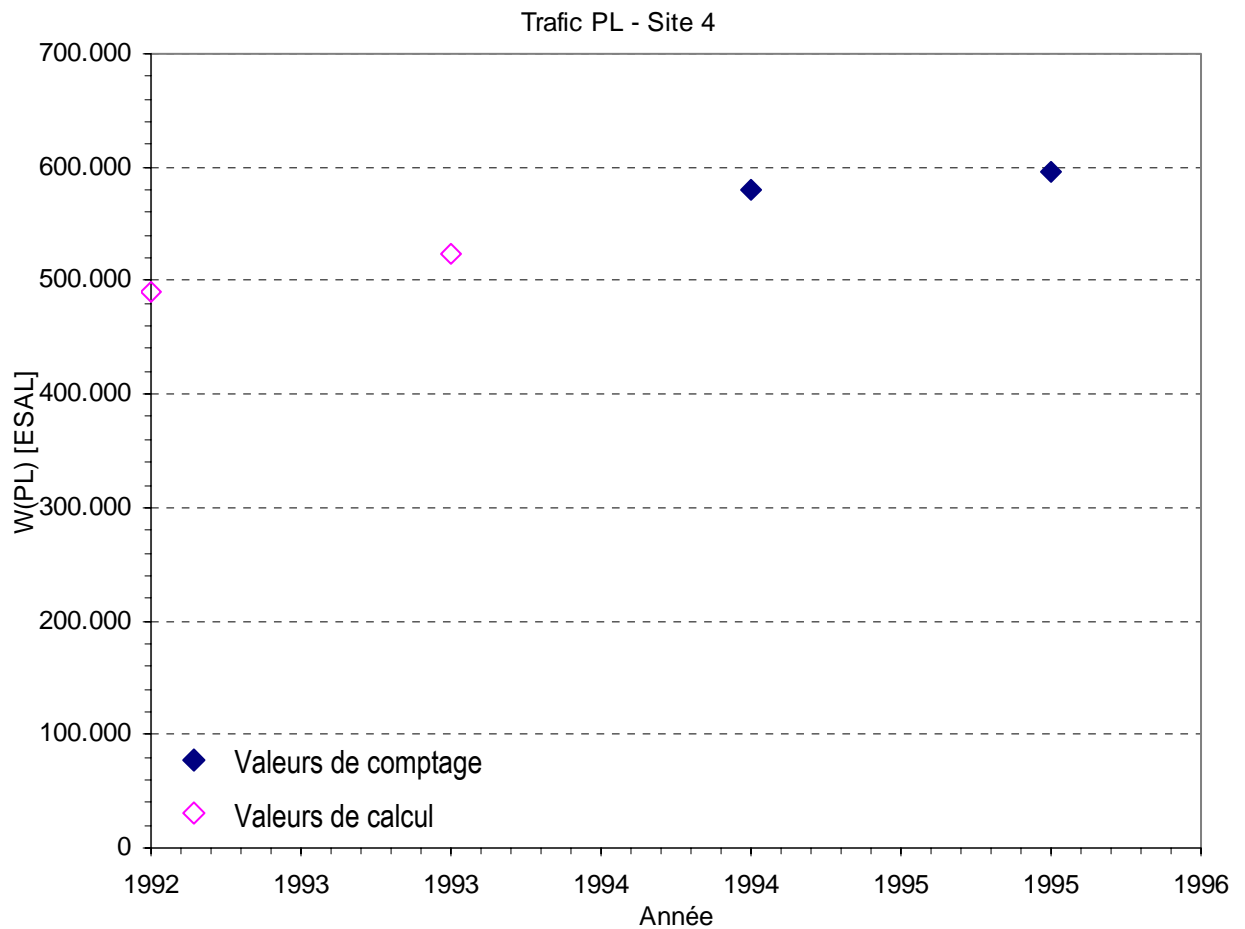


Figure 36: Trafic équivalent total sur les sites 4.

### 7.2.4 Vue d'ensemble

Site	% PL	fv	k	W [ESAL]
1	11,68	45%	1,30	<b>3.654.537</b>
2	13,43	45%	1,30	<b>3.499.632</b>
3	13,43	45%	1,30	<b>3.499.632</b>
4	13,43	45%	1,30	<b>2.189.115</b>

Tableau 34: Charges de trafic sur tous les sites

### 7.3 Températures déterminantes

La détermination des températures déterminantes s'est fait selon [3] en utilisant la méthode décrite dans le chapitre 4.3.1.

Site	Région	Altitude [km]	Coefficients					$T_{s_{max}}$ [°C]	$sd_{max}$	$T_{s_{max,95\%}}$ [°C]
			a	b	c	d	l			
1	Sud des Alpes	0,7	-4,2	15,2	-17,2	50,2	-	44,17	0,961	45,87
2	Sud des Alpes	0,3	-4,2	15,2	-17,2	50,2	-	46,29	0,869	47,83
3	Sud des Alpes	0,3	-4,2	15,2	-17,2	50,2	-	46,29	0,869	47,83
4	Sud des Alpes	0,3	-4,2	15,2	-17,2	50,2	-	46,29	0,869	47,83

Tableau 35: Détermination des températures maximales selon [3].

## 7.4 Vitesses déterminantes

Les quatre matériaux de chaussée utilisés pour la vérification de la méthode ont été extraits d'autoroutes. Comme pour tous les autres sites autoroutiers pris en compte dans l'étude, la vitesse des poids lourds a été estimée en moyenne de 90 km/h.

## 7.5 Intégration des points dans la méthode prédictive

Site	W	V [km/h]	$\Theta$ [°C]	T in situ	T calc.
1	3.654.537	90	45%	15,0	13,4
2	3.499.632	90	45%	9,4	9,2
3	3.499.632	90	45%	9,4	7,2
4	2.189.115	90	45%	18,3	18,7

Tableau 36: Valeurs déterminantes pour l'utilisation de la méthode.

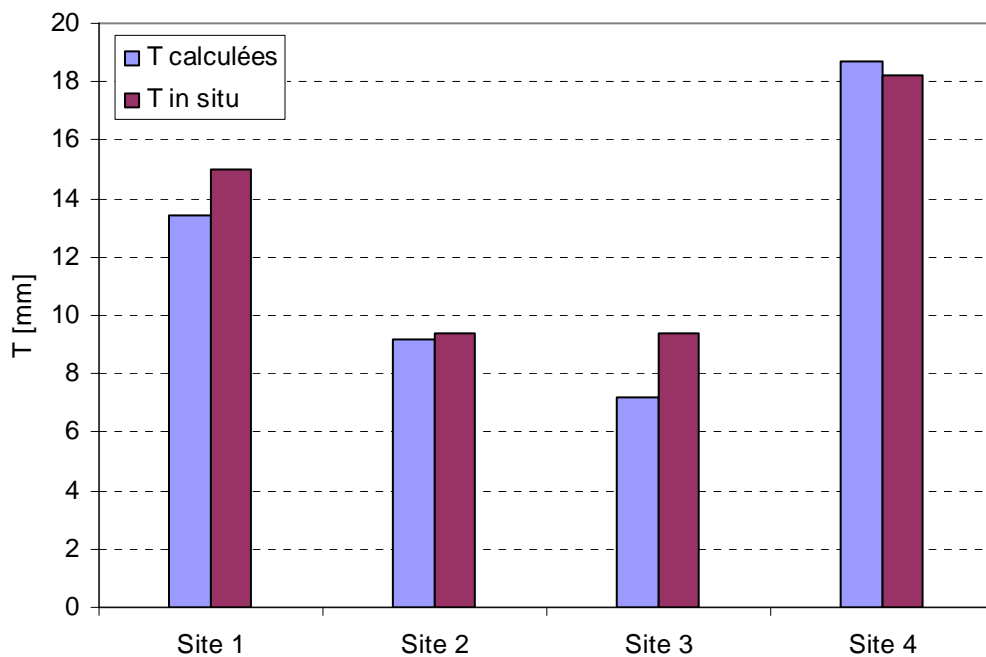


Figure 37: Valeurs des ornières mesurées in situ et calculées par le modèle.

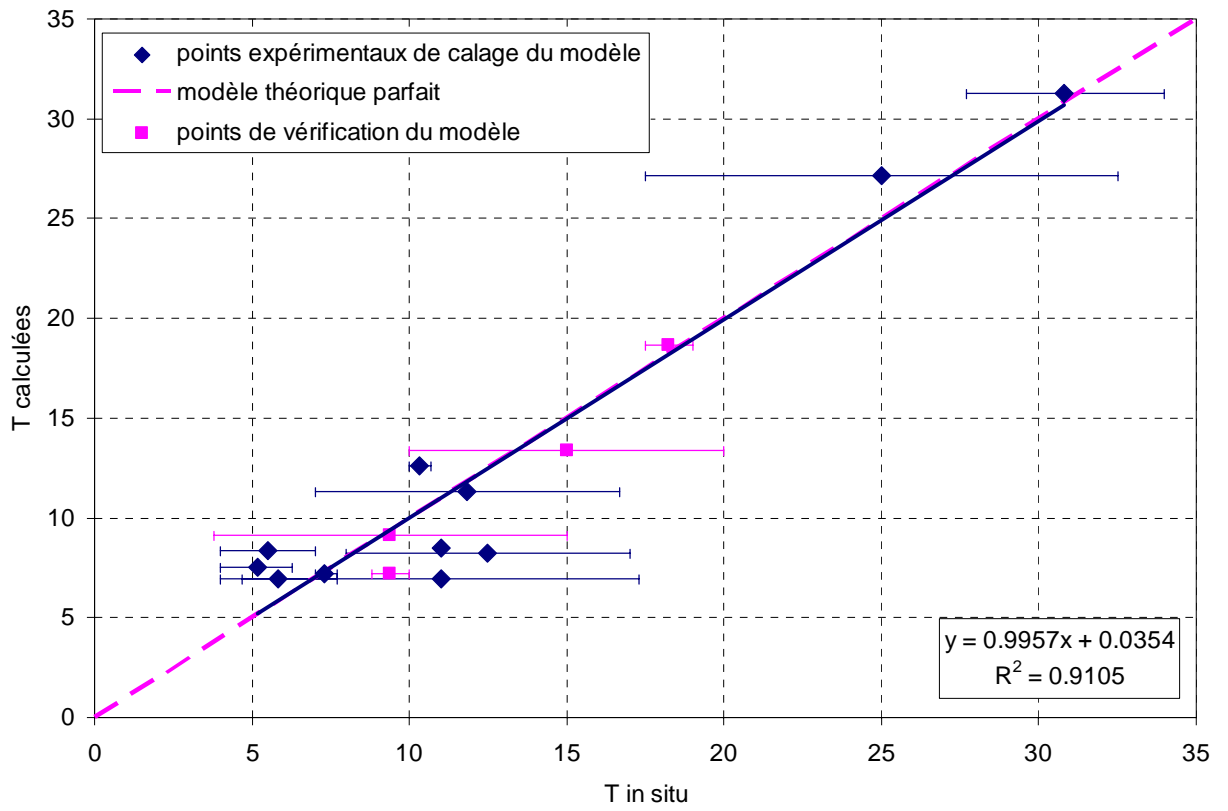


Figure 38: Valeurs des ornières des matériaux initiaux et des matériaux de vérification.

## 8 Conclusions

L'objectif de développer une méthode capable de prédire la profondeur d'ornière d'une chaussée a été atteint. Le modèle se base sur l'équation empirique d'orniérage la plus utilisée et sur ses coefficients déterminés expérimentalement.

Le concept général consiste à prendre comme point de départ l'équation d'orniérage et de l'appliquer au phénomène d'orniérage qui se produit dans la réalité en introduisant trois hypothèses fondamentales:

- Le phénomène d'orniérage réel que subit la chaussée suit la même fonction que celui qui est observé en laboratoire
- Il n'y a pas d'orniérage structurel: l'orniérage se produit seulement dans le matériau bitumineux et non dans le sol
- Il n'y a pas de gradient de température dans la couche d'enrobé bitumineux: la température est constante dans tout le matériau

En parallèle et pour pouvoir utiliser le modèle prédictif, la connaissance de paramètres externes au matériau est indispensable. Il s'agit des caractéristiques de trafic, comme la charge de trafic lourd et la vitesse des véhicules, ainsi que des caractéristiques environnementales, comme la température de l'enrobé in situ. Pour être en mesure de comparer des matériaux entre eux par rapport à des valeurs de référence choisies, des coefficients de calage ont été introduits pour chaque paramètre indépendant du matériau.

Le modèle a été calé en analysant les propriétés de onze sites représentatifs des conditions rencontrées en Suisse correspondant à onze matériaux indépendants entre eux. Plusieurs essais ont été menés à bien et les caractéristiques du liant, de l'enrobé ainsi que la résistance à l'orniérage ont été analysées après avoir procédé à une campagne de mesure des ornières in situ. Les valeurs d'ornières considérées correspondent à une valeur moyenne calculée en fonction de l'ornière gauche et de l'ornière droite sur une même voie de circulation.

L'équation finale du modèle permet donc d'obtenir, à plus ou moins long terme, des valeurs d'ornière moyennes après avoir déterminé les coefficients expérimentaux d'orniérage  $\alpha$  et  $\beta$ , la charge de trafic, la vitesse des véhicules, la température du site et les coefficients de calage correspondant aux paramètres de trafic et de température.

Le calage du modèle a été effectué à partir de l'observation d'un nombre relativement limité de matériaux. Sur la représentation graphique du modèle, on observe deux groupes de points. L'un au droit des petites valeurs d'ornières et l'autre dans les plus grandes valeurs. Cette discontinuité pourrait certainement être atténuée en utilisant un plus grand nombre de matériaux et ainsi améliorer et obtenir une meilleure répartition des points dans le graphique du modèle. Certains coefficients de calage pourraient également s'en trouver réajustés.

Les matériaux utilisés pour l'élaboration de la méthode prédictive ont été d'abord choisis parce qu'ils présentaient une ornière visible et mesurable. Il faut noter que la majorité de ces matériaux ne satisfont pas le critère de la norme et sont par conséquent considérés comme de mauvais matériaux vis-à-vis de l'orniérage.

En considérant toutes les marges d'incertitude auxquelles on doit faire face lors de la détermination des différentes valeurs à introduire dans l'équation principale du modèle et bien que certaines hypothèses générales aient été posées au départ, celui-ci donne des résultats satisfaisants lors de sa vérification avec quatre matériaux supplémentaires, indépendants des matériaux utilisés pour le calage du modèle ( $R^2=0,91$ ). La correspondance entre les valeurs d'ornières calculées par le modèle et les ornières mesurées in situ est acceptable mais des études supplémentaires avec une variété plus étendue de matériaux et de sites pourraient améliorer le modèle proposé.



## 9 Bibliographie

- [1] ANDERSON R. M., TURNER P. A., PETERSON R. L., MALLICK R. B., "Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 478, 2002.
- [2] ANDERSON R. M., CHRISTENSEN D. W., BONAQUIST R., "Estimating the Rutting Potential of Asphalt Mixtures using Superpave Gyrotory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Volume 72, pp. 1-26, 2003.
- [3] ANGST Ch., REMUND J., "Klimatische Grundlagen der Schweiz für die SHRP-Bitumen klassifikation", Office fédéral des routes, 473, 2000.
- [4] ARCHILLA A. R., MADANAT S., "A Statistical Model of Pavement Rutting in Asphalt Concrete Mixes", Transportation Research Board, 2001.
- [5] ARCHILLA A.-R., MADANAT S., "Development of a pavement rutting model from experimental data", Journal of transportation engineering, pp. 291-299 jul.-aug. 2000.
- [6] ASCHENBRENER T., "L'orniéreur LCPC testé sur les chaussées du Colorado", Revue Générale des Routes et Aéroports, 729, pp. 66-72, 1995.
- [7] BENSE P., "Dangers, causes et remèdes de l'orniérage des chaussées", Revue Générale des Routes et Aéroports, 759, pp. 45-50, 1998.
- [8] BHAIRAMPALLY R. K., LYTTON R. L., LITTLE D. N., "Numerical and Graphical Method to Assess Permanent Deformation Potential for Repeated Compressive Loading of Asphalt Mixtures", Transportation Research Record, 1723, pp. 150-158, 2000.
- [9] BROSSEAUD Y., HIERNAUX R., "Étude de sensibilité aux déformations permanentes de bétons bitumineux européens et japonais par l'orniéreur LPC", Mechanical Tests for Bituminous Materials, pp. 309-316, Lyon, 1997.
- [10] CORTÉ J.-F., BROSSEAUD Y., GRAMSAMMER J.-C., TIRET L., CAROFF G., SPERNOL A., "Influence du facteur liant et de la configuration des charges roulantes", Revue Générale des Routes et Aéroports, 714, pp. 59-68, 1994.
- [11] CORTÉ J.-F., BROSSEAUD Y., KERZREHO J.-P., SPERNOL A., "Etude de l'orniérage des couches de roulement au manège d'essai du LCPC", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 217, pp. 13-30, 1998.
- [12] DEACON J. A., HARVEY J. T., GUADA I., POPESCU L., MONISMITH C. L., "An Analytically-Based Approach to Rutting Prediction", Transportation Research Board, 2002.
- [13] DESCROIX P., "Esso Road Design Technology. Un ensemble performant d'outils d'aide à la decision. Un exemple: l'analyse non linéaire de l'orniérage d'une chaussée", Revue Générale des Routes et Aéroports, 748, pp. 39-44, 1997.
- [14] DROIT SUR LA CIRCULATION ROUTIÈRE, Edition 2002.
- [15] DUMONT A.-G., HUET M., SIMOND E., SCHWERY B., AEBERSOLD S., "Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts, Rapport n°1: chaussée et liants", Office fédéral des routes, 1994.
- [16] EPPS J. A., HAND A., SEEDS S., SCHOLZ T., ALAVI S., ASHMORE C., MONISMITH C. L., DEACON J. A., HARVEY J. T., LEAHY R., "Recommended Performance-Related Specification for

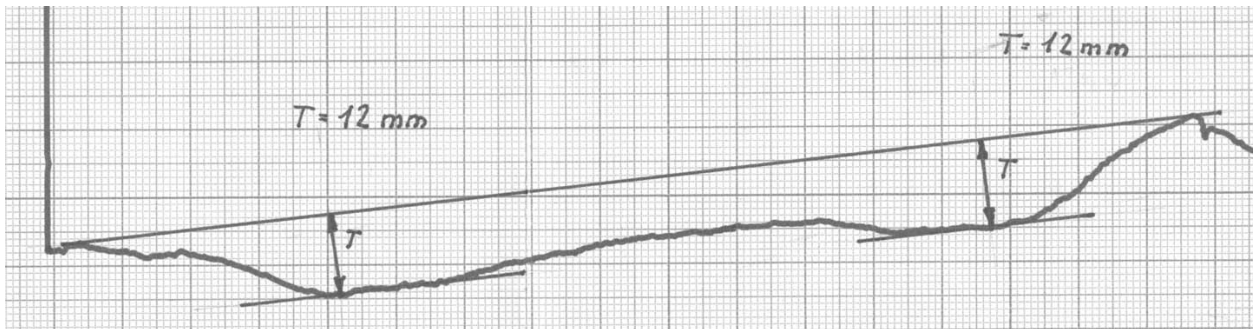
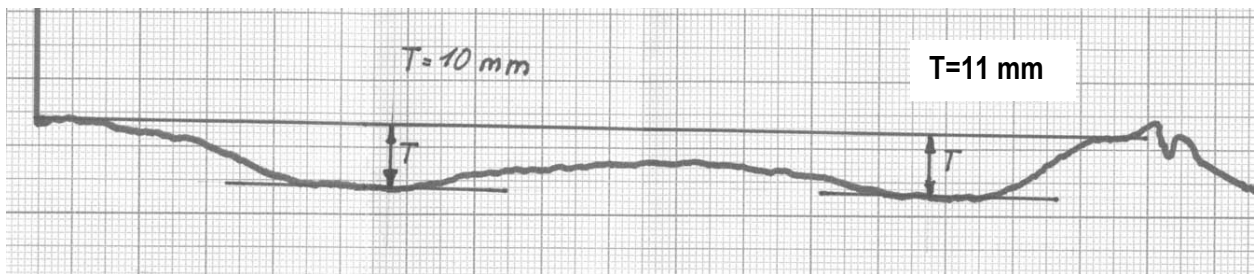
- Hot-Mix Asphalt Construction: Results of the WesTrack Project", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 455, 2002.
- [17] FANG H., HAND A. J. T., WHITE T. D., HADDOCK H. E., "Determining Pavement Layer Contributions to Rutting by Surface Profile Analysis", Transportation Research Board, 2003.
- [18] FAURE M., SIMONCELLI J.-P., BERTAUX J.-M., "Orniérage des mélanges bitumineux: L'influence du type de poids lourd", Revue Générale des Routes et Aéroports, 697, pp. 44-48, 1992.
- [19] FRANCKEN L., "Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression", Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1977.
- [20] FRANCKEN L., "RILEM interlaboratory test on the rheology of bituminous binders", Bituminous Binders and Mixes, RILEM report 17, 1998.
- [21] GRIMAUX J.-P., HIERNAUX R., "Utilisation de l'orniéreur type LPC", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées", num. spéc. V, pp. 165-172, 1977.
- [22] HUH J. D., NAM Y. K., "Relationship between Asphalt Binder Viscosity and Pavement Rutting", Transport Research Board, 2001.
- [23] JOLIVET Y., FORTIN Y., DEBRIS G., "Orniérage des enrobés bitumineux: incidence de la température anneau et bille et de la viscosité des bitumes", IV<sup>e</sup> Symposium Eurobitume, 1989.
- [24] JOLIVET Y., MALOT M., RAMOND G., PASTOR M., "Contribution des mesures rhéologiques sur liants à la prévision de l'orniérage en laboratoire", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées", 194, pp. 3-10, 1994.
- [25] JOLIVET Y., MALOT M., "Précaution dans l'interprétation des résultats d'orniérage obtenus avec le simulateur de trafic LPC", Revue Générale des Routes et Aéroports, 787, pp. 25-28, 2000.
- [26] KANDHAL P. S., COOLEY L. A., "Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 508, 2003.
- [27] KONG KAM WA N. Y., VISSER A. T., "Development of a Simple Method for the Prediction of Permanent Deformation of Asphalt in the Field", Road Materials and Pavement Design, Volume 4, pp. 225-239, 2003.
- [28] NF P 98-253-1, "Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, partie 1: Essai d'orniérage", AFNOR, 1991.
- [29] RECUEIL DE NORMES ISO, "Méthodes statistiques pour la maîtrise de la qualité", Organisation internationale de normalisation (ISO), 1995.
- [30] SPACEK P., DÜGGELI P., "Les vitesses des camions dans les rampes et les pentes", Office fédéral des routes, 83, 1984.
- [31] SN 640 040, "Projet, bases; types de routes"
- [32] SN 640 138a, "Tracé, Voies additionnelles en rampe", VSS, 1986.
- [33] SN 640 320a, "Dimensionnement, Trafic pondéral équivalent", VSS, 2001.
- [34] SN 640 431b, "Revêtements en béton bitumineux, Conception, exigences, exécution", VSS, 1997.

- [35] SN 640 432a, "Couches de roulement en Splittmastixasphalt, Conception, exigences, exécution", VSS, 1996.
- [36] SN 640 520a, "Planéité, Contrôle de la géométrie", VSS, 1977.
- [37] SN 640 810c, "Granulats minéraux et sols", VSS, 1986.
- [38] SN 670 510, "Liants bitumineux, prescriptions d'essai – Récupération du liant résiduel de solutions provenant d'extractions", VSS, 1992.
- [39] UNION EUROPEENNE, "PARIS – Performance Analysis of Road Infrastructure", 4<sup>th</sup> Framework Programme, 1998.
- [40] WISTUBA M., LITZKA S., BLAB R., "Reihe Straßenforschung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie", Institute für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, 2001.

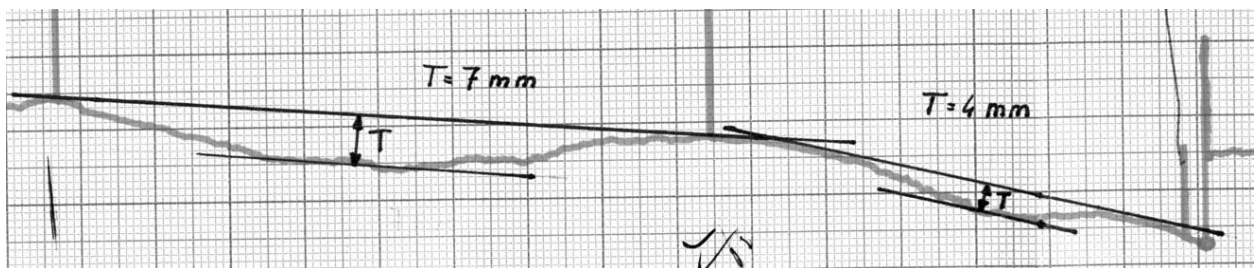
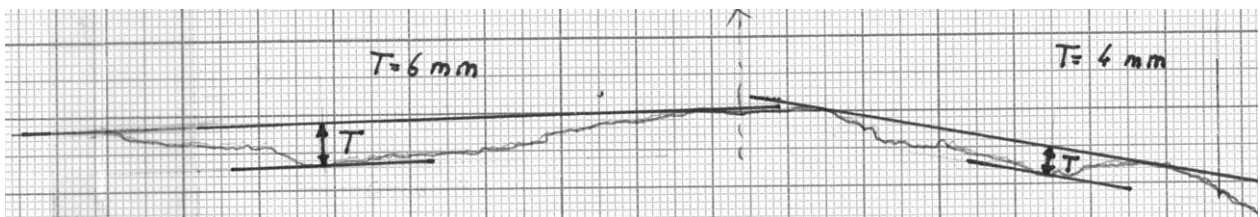
## 10 Annexes

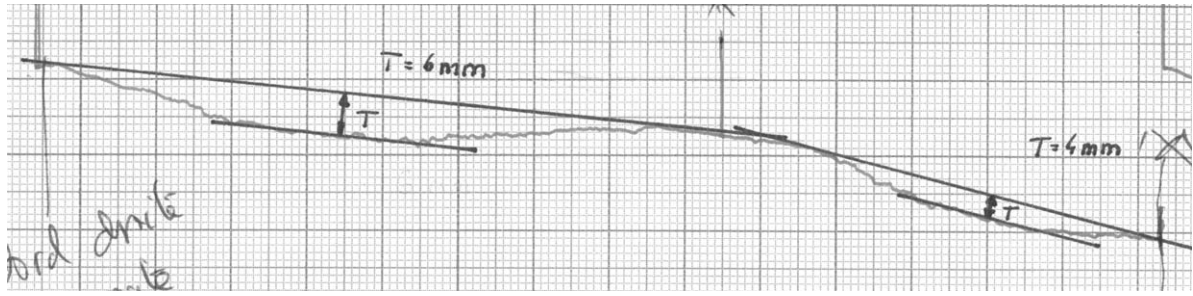
### 10.1 Mesure de la planéité transversale

#### 10.1.1 FR – Kleingurmels

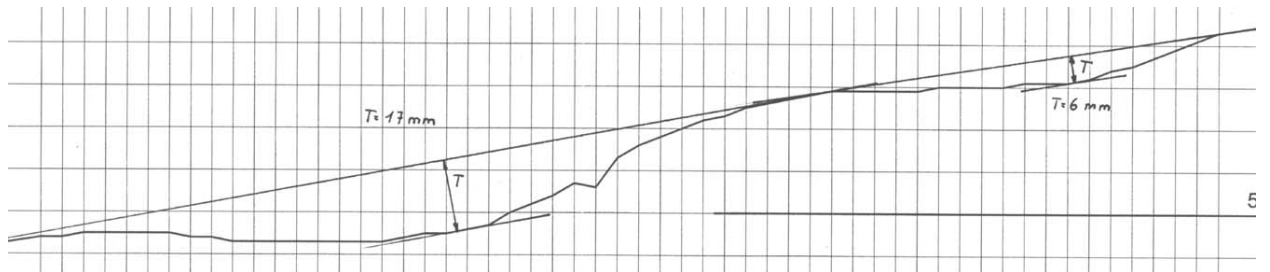
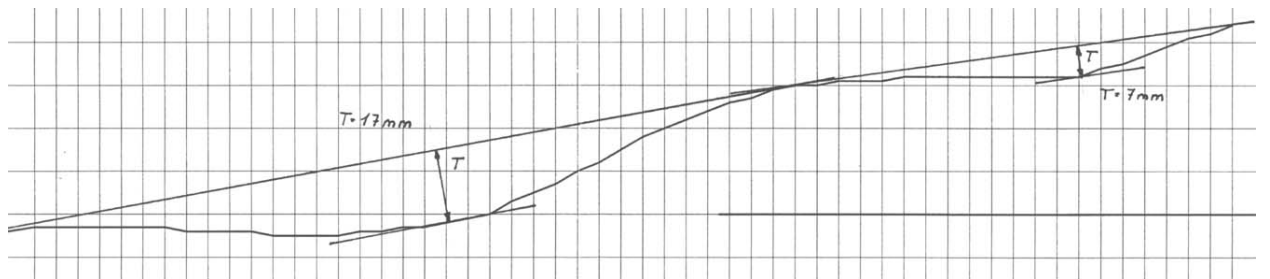
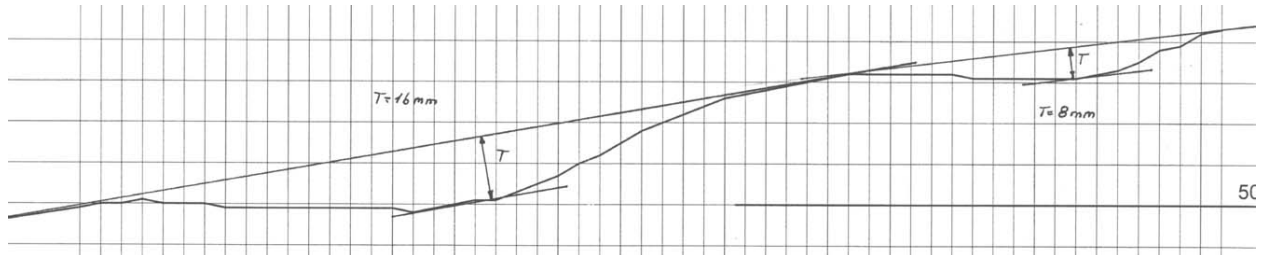


#### 10.1.2 FR – Montbovon

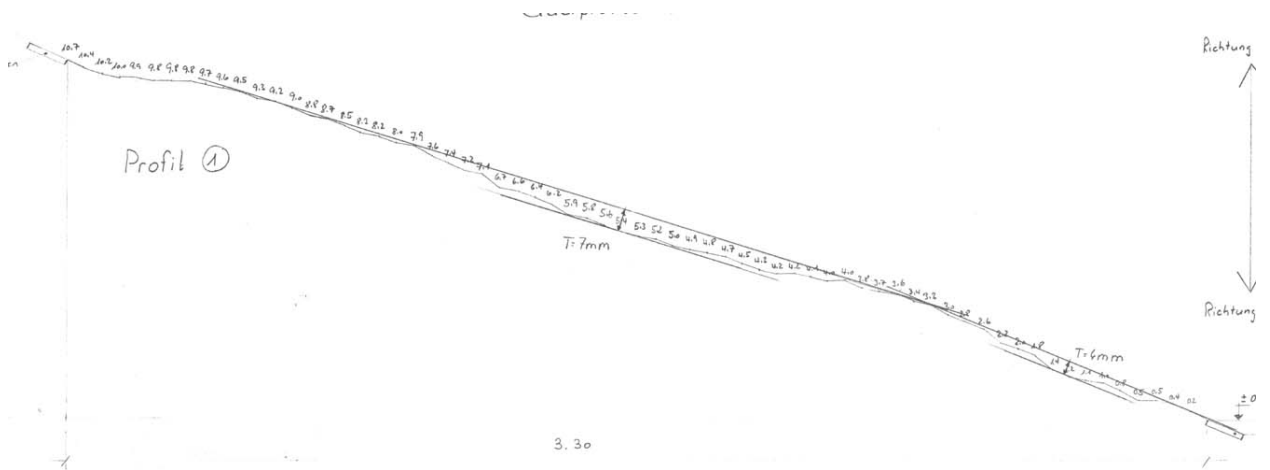


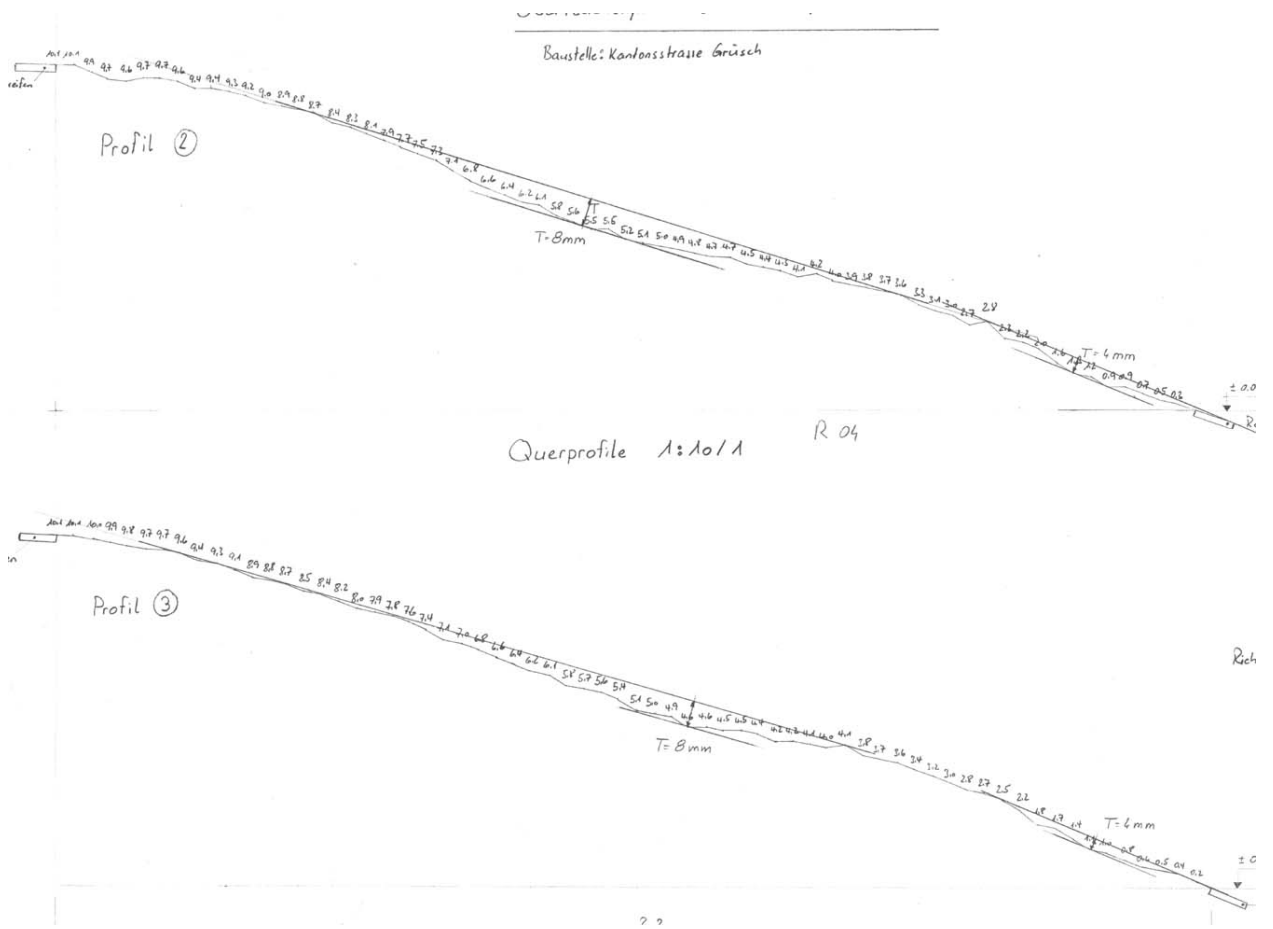


10.1.3 GR – Davos

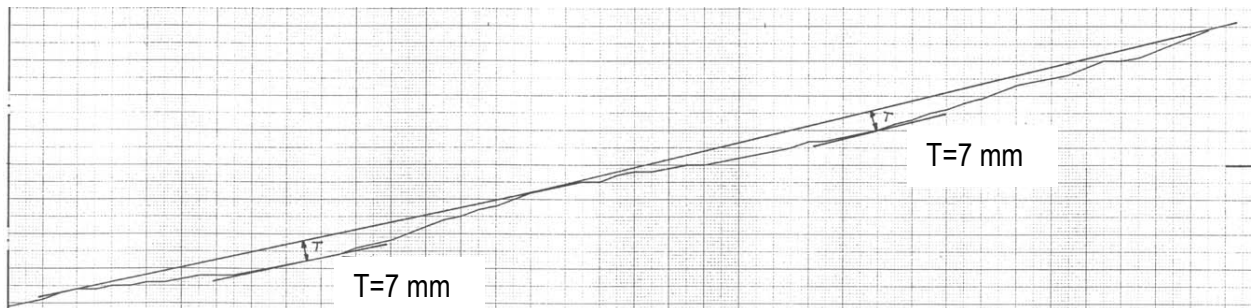
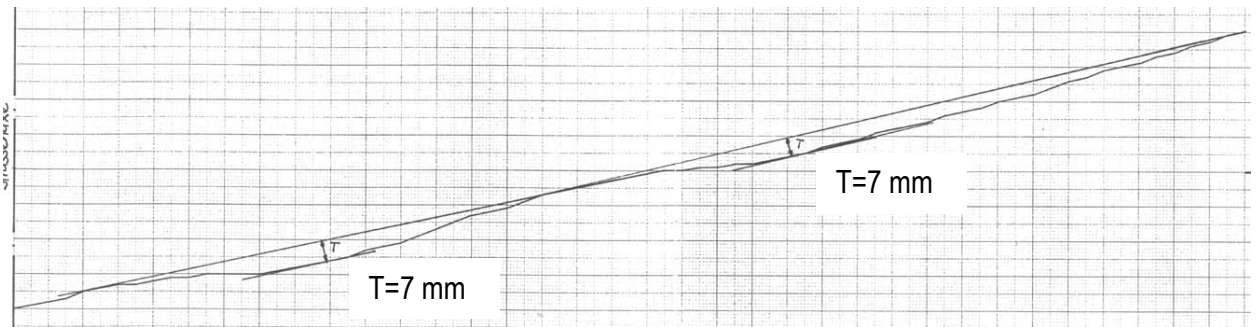


10.1.4 GR – Grüşch

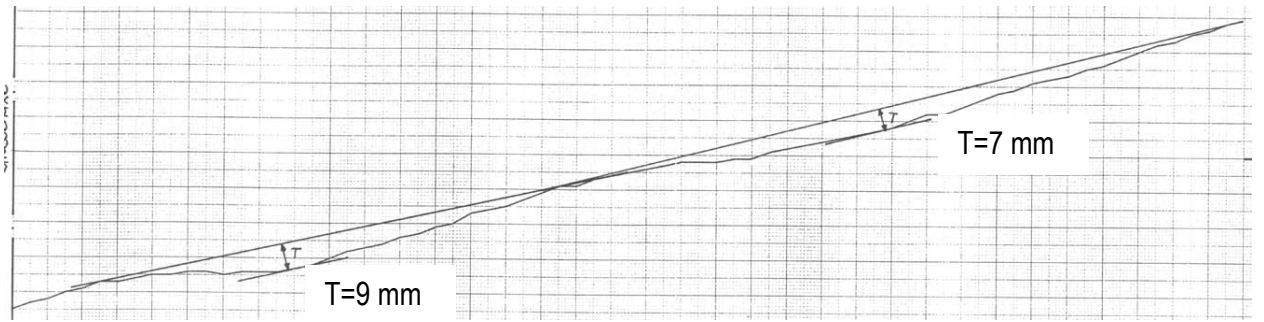




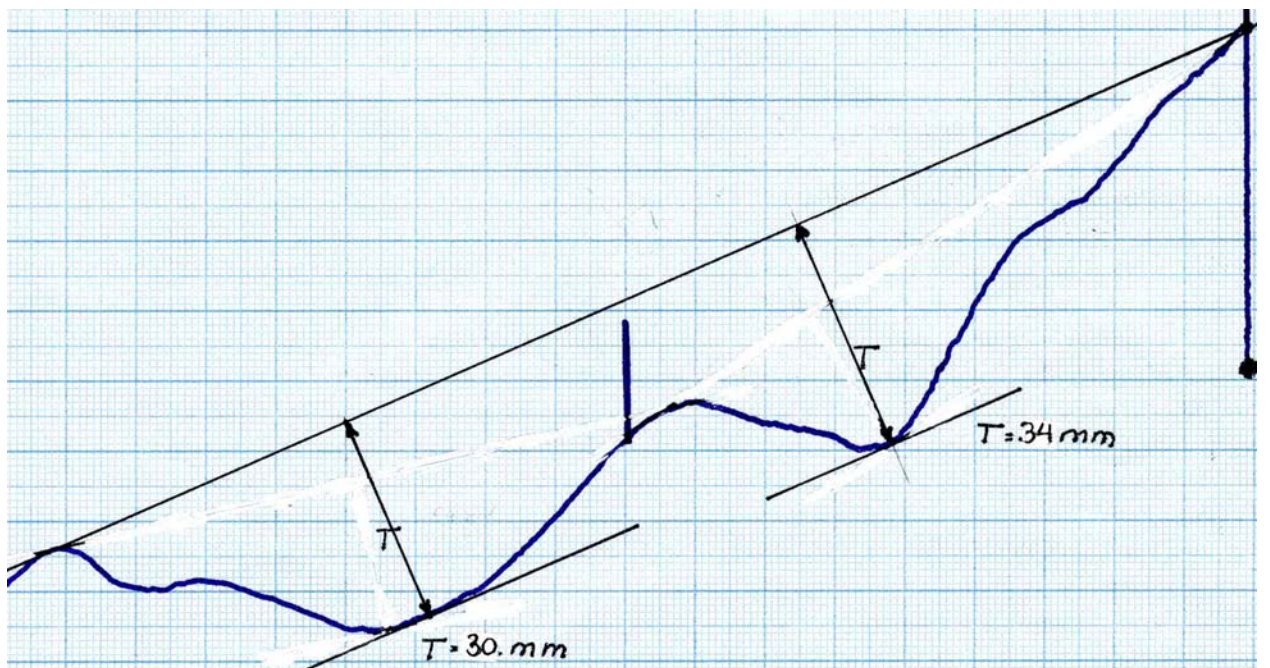
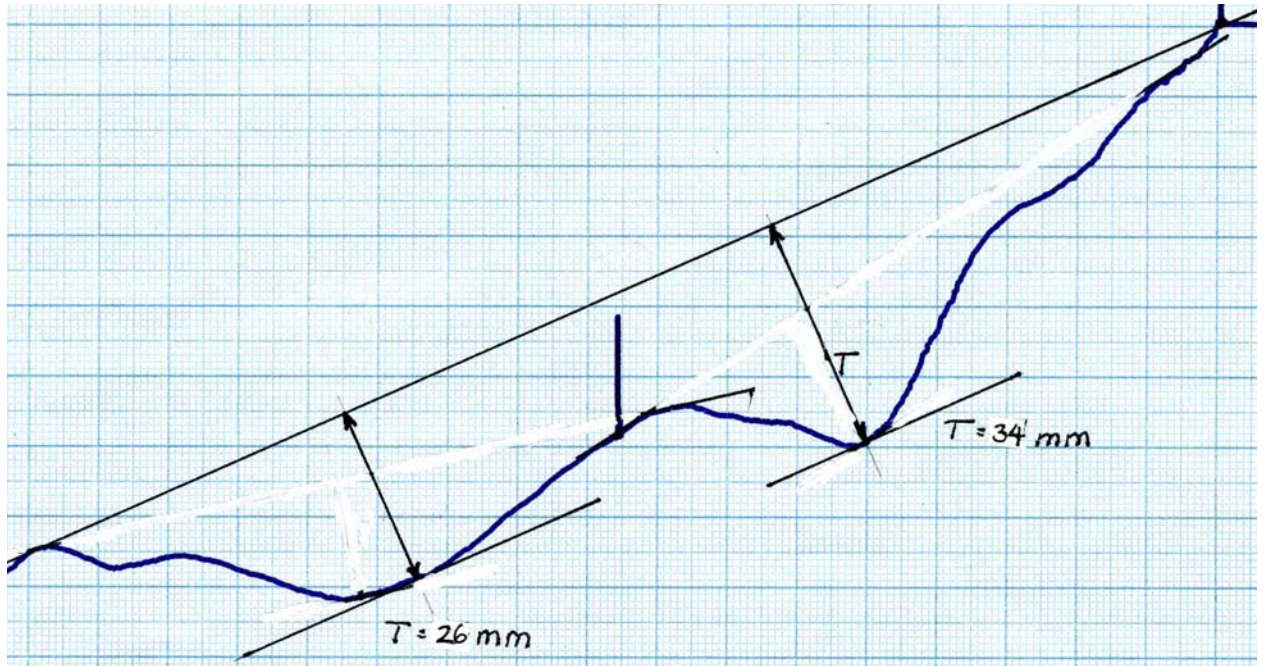
10.1.5 GR – S-chanf



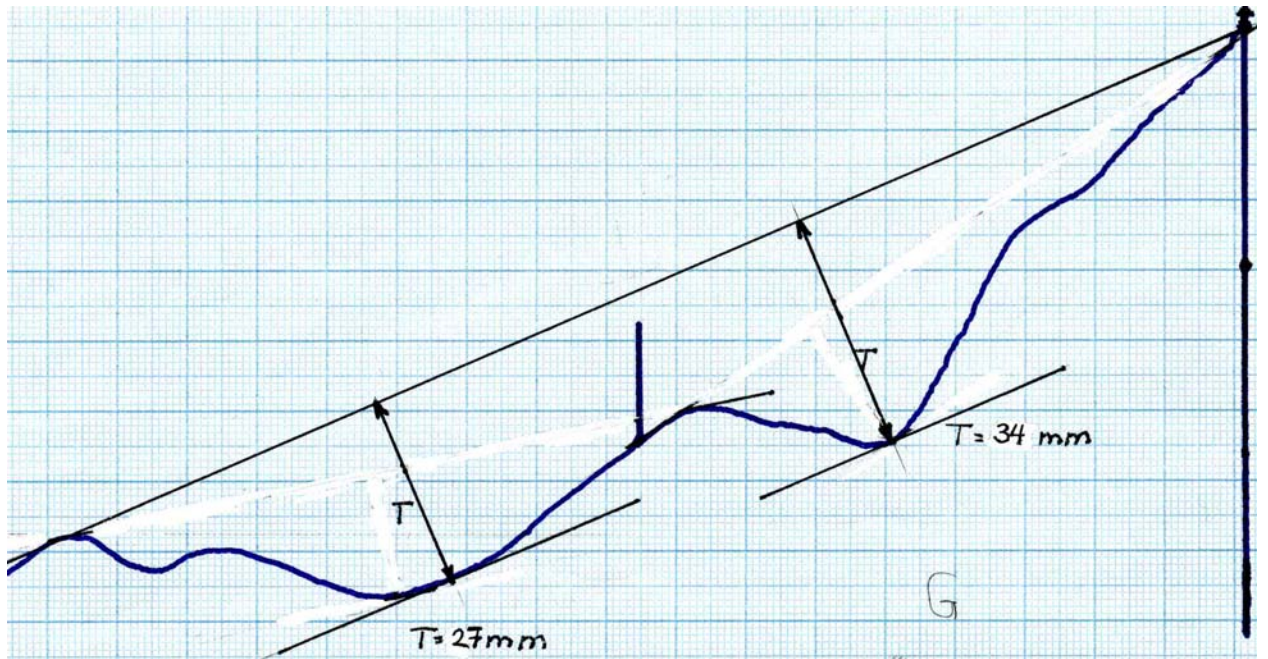




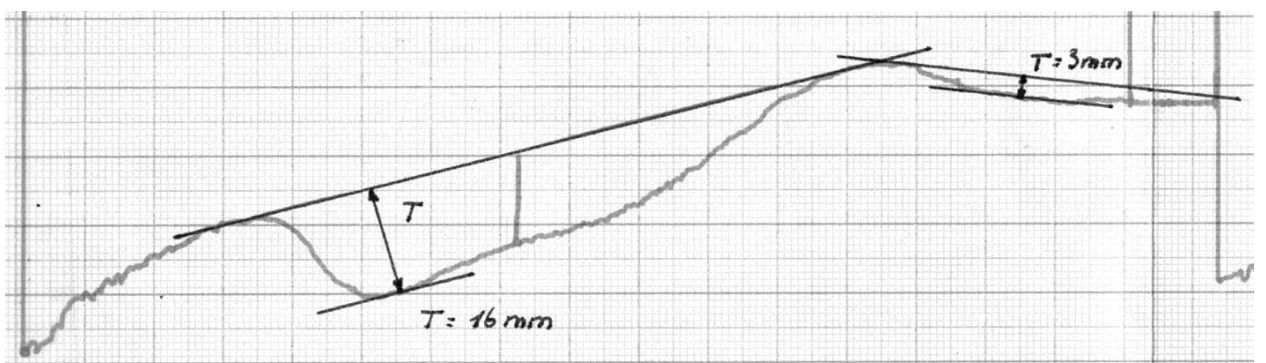
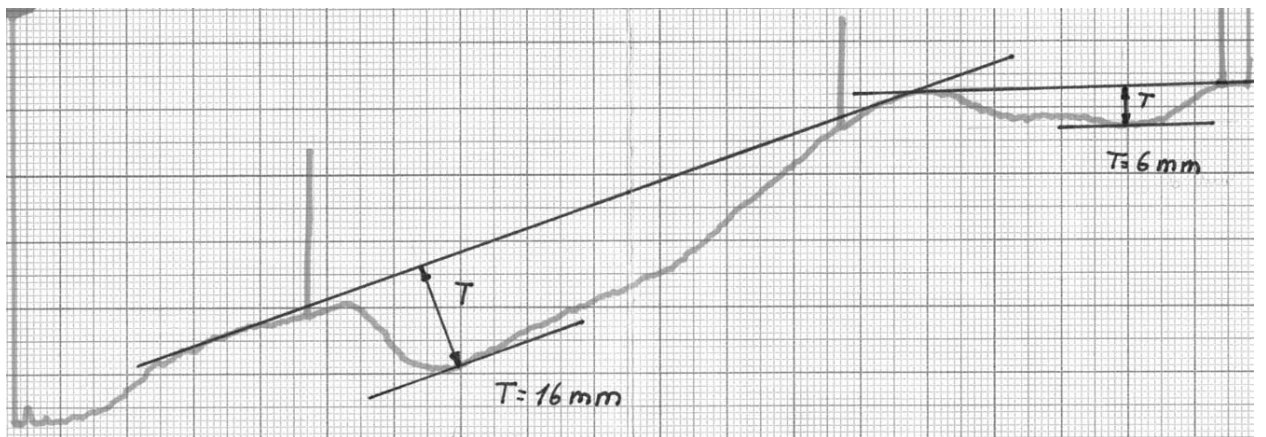
### 10.1.6 JU – Delémont



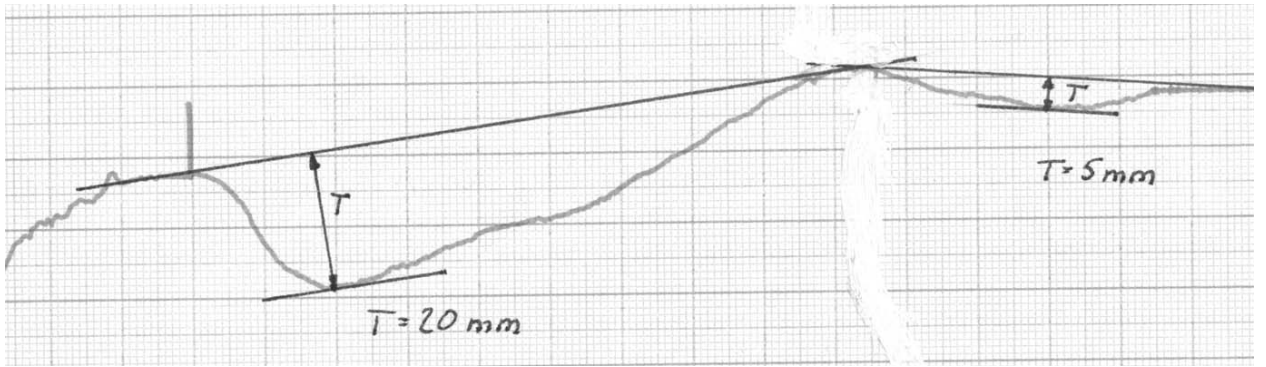




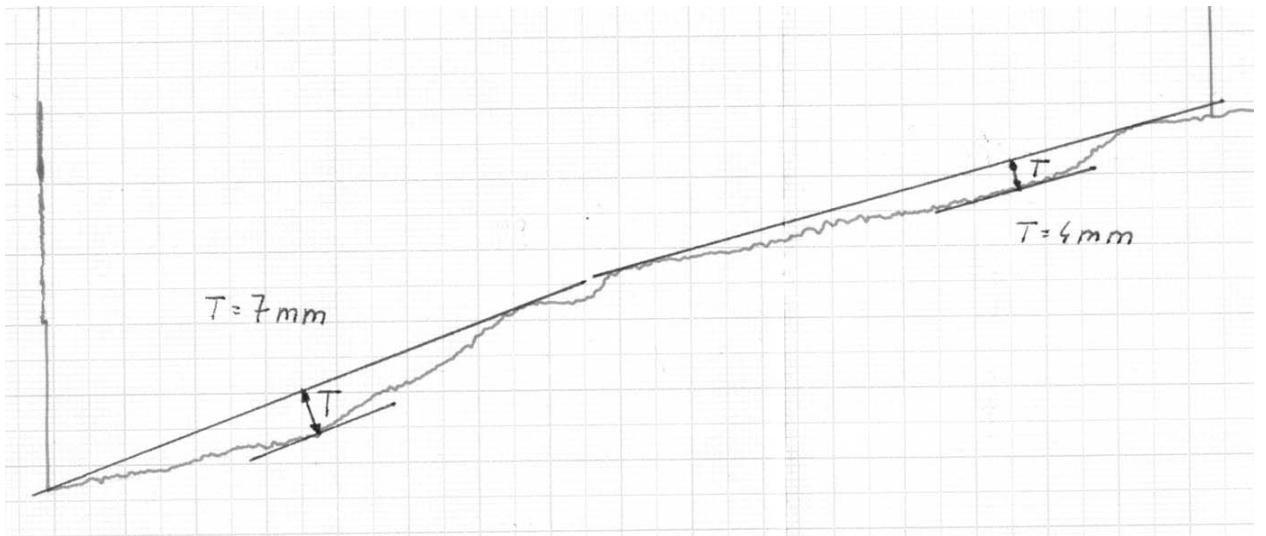
### 10.1.7 JU - St-Brais

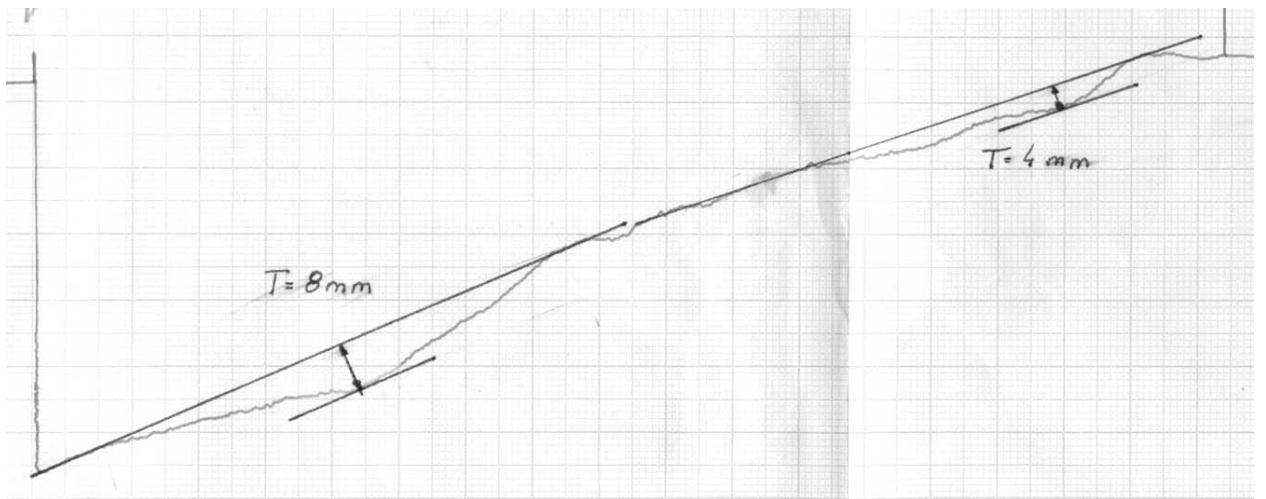




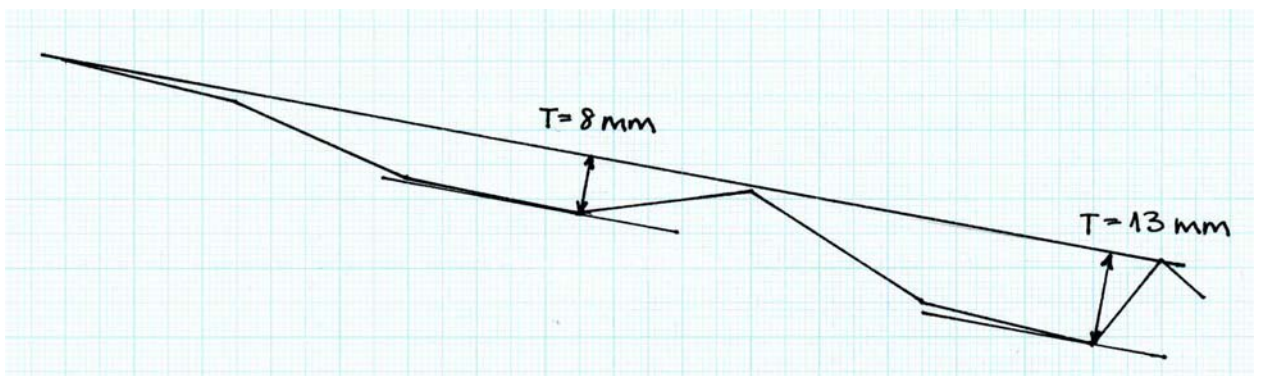
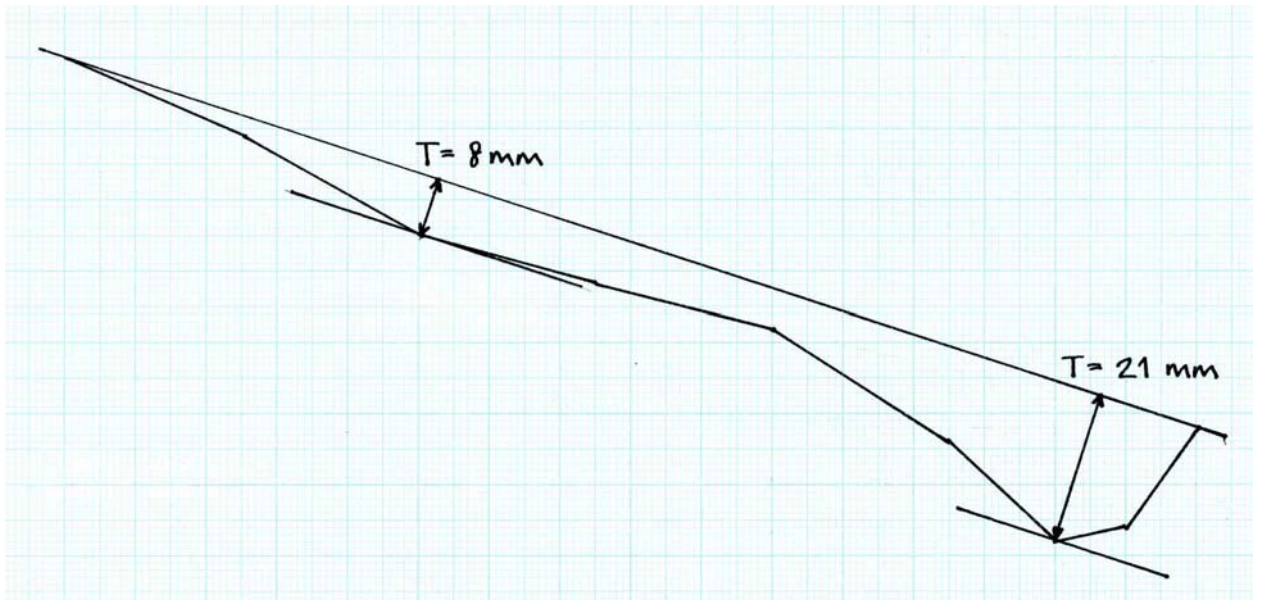


10.1.8 VD - Lonay

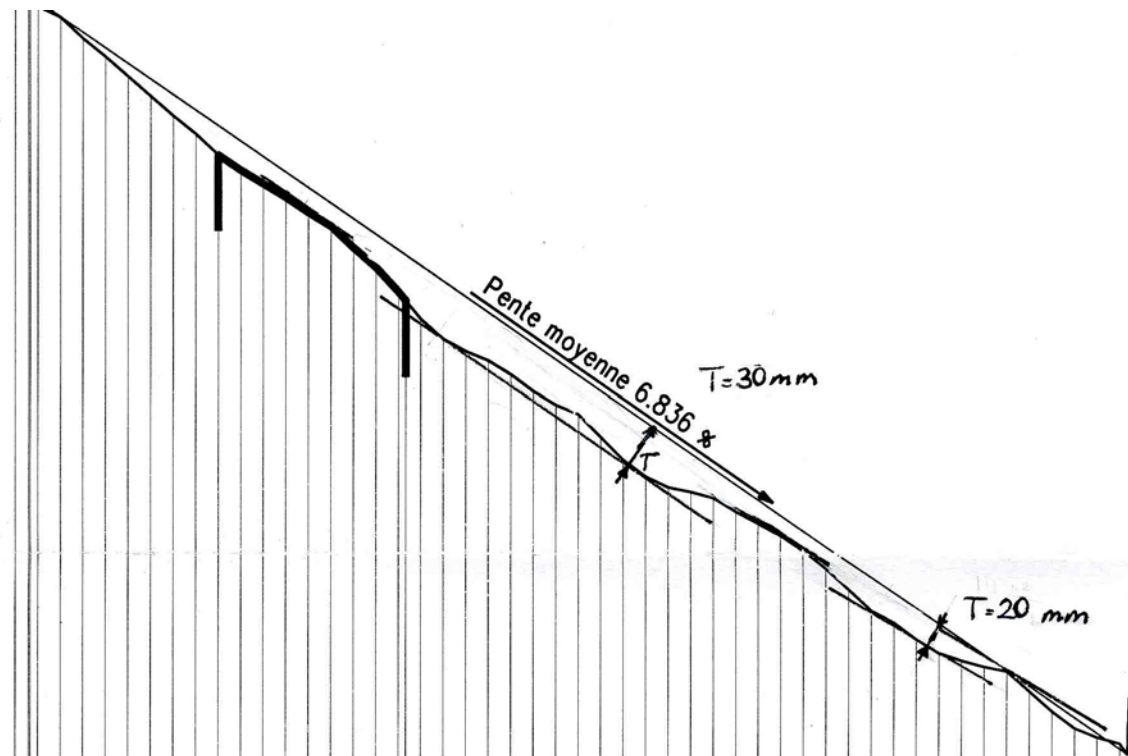
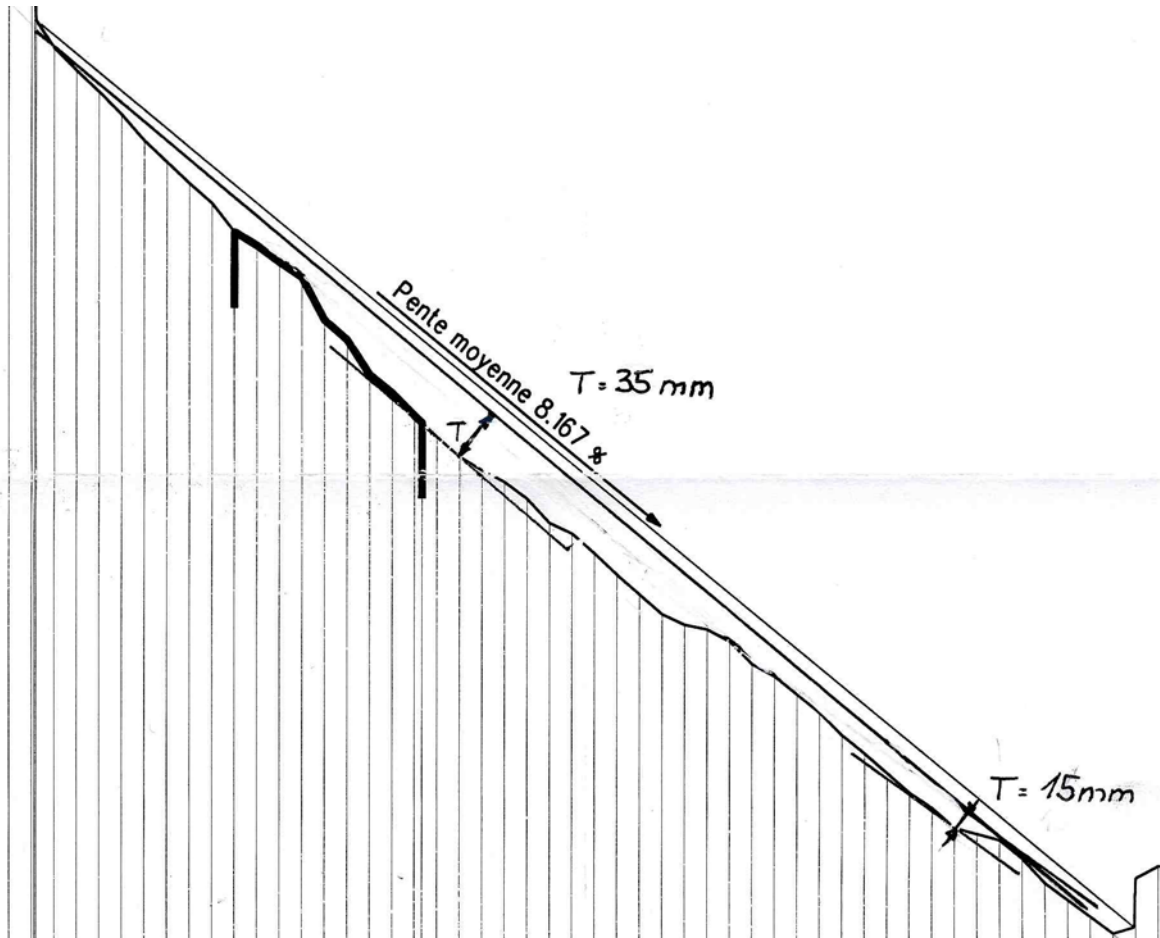




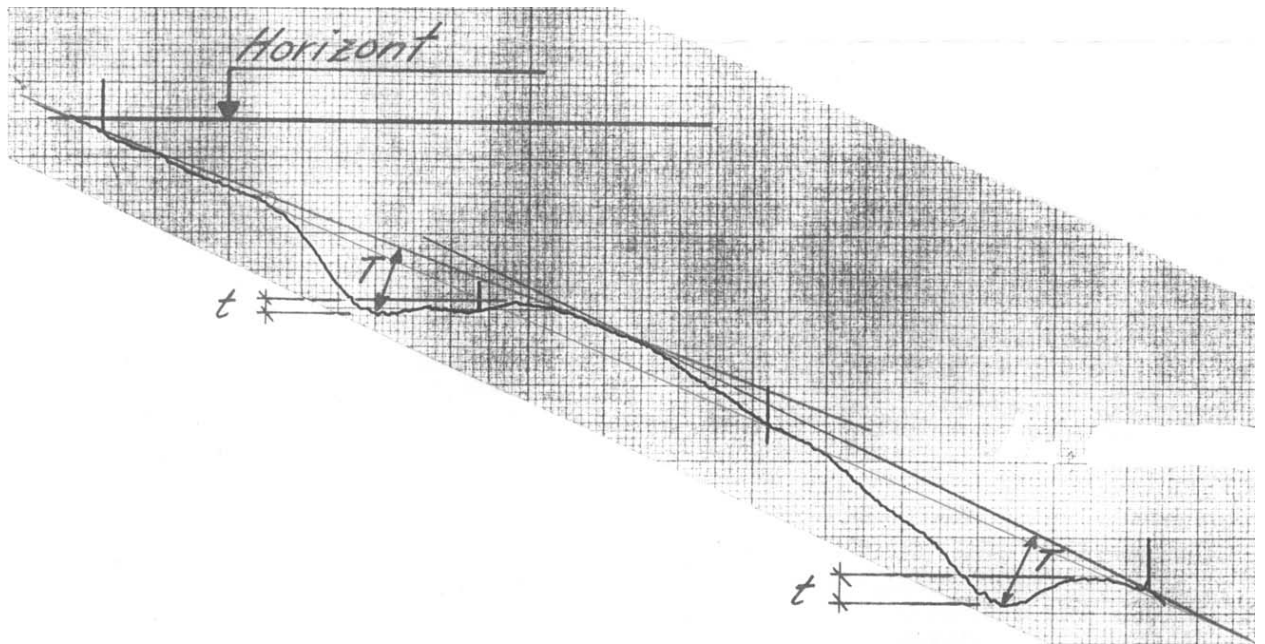
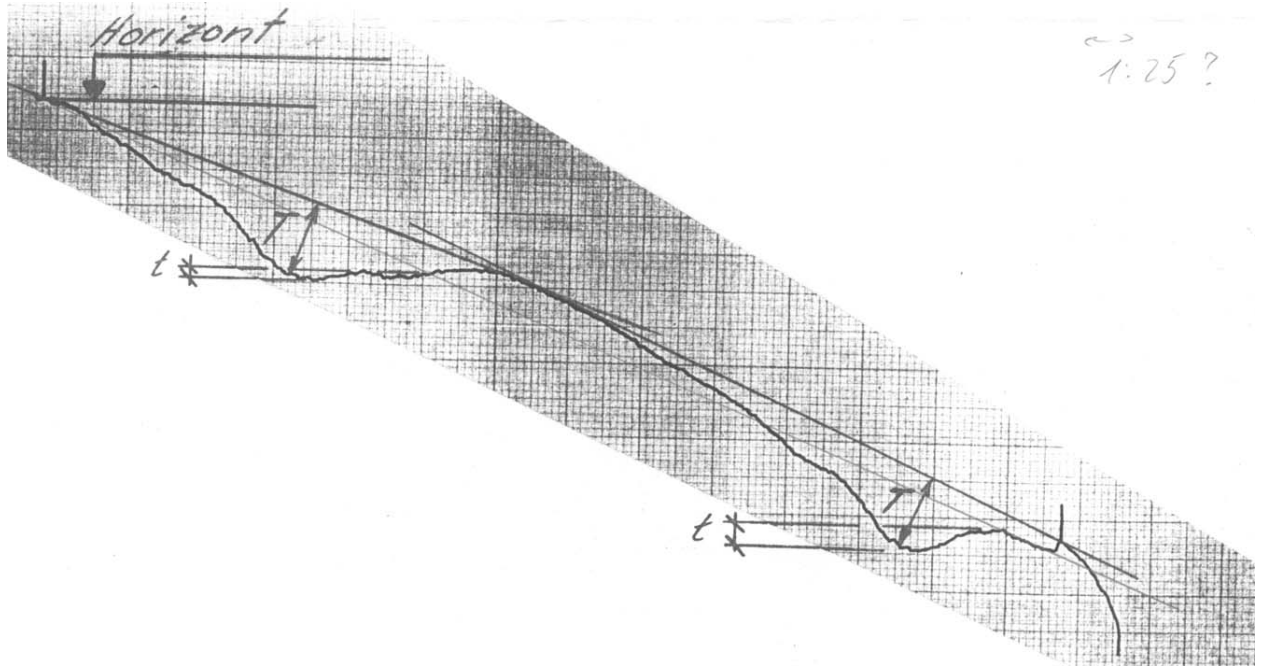
### 10.1.9 VS – Bovernier

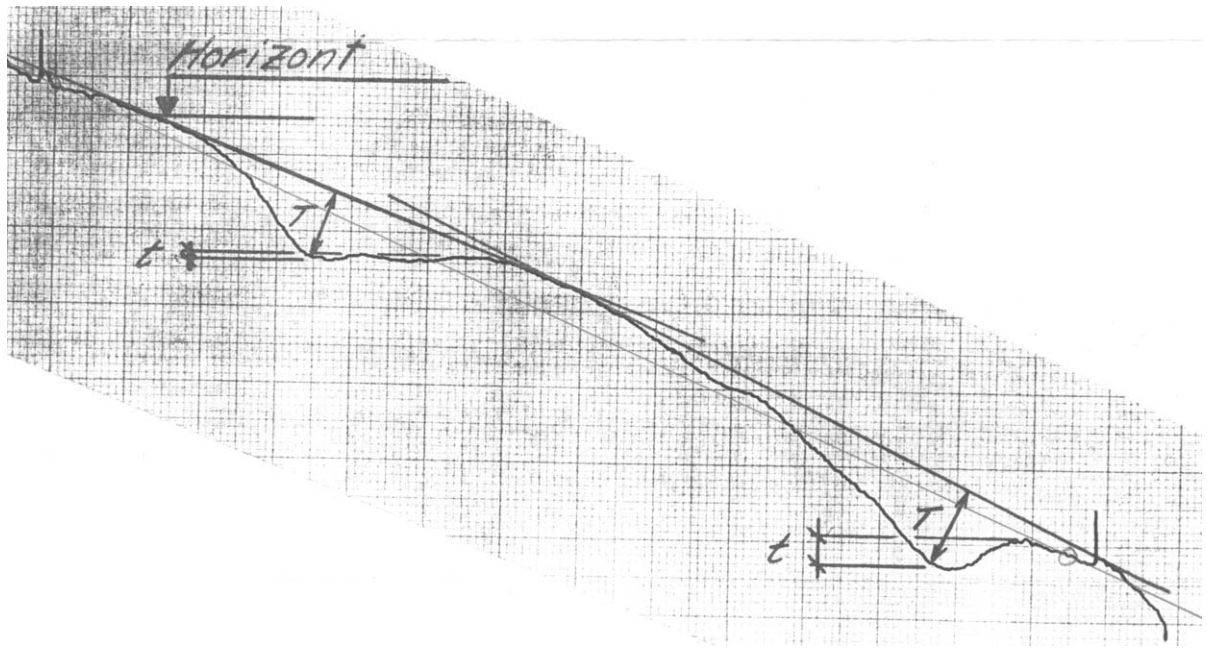


10.1.10 VS – Monthey



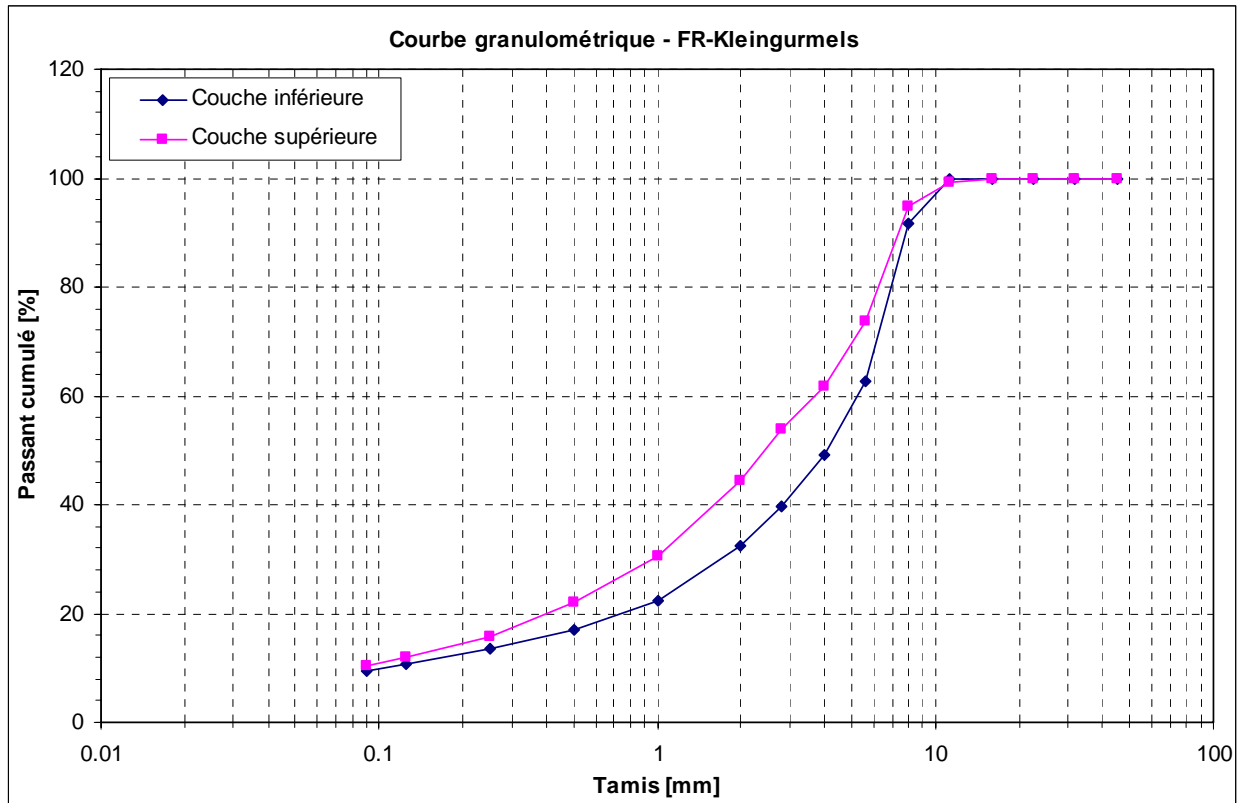
10.1.11 ZH – Bertschikon





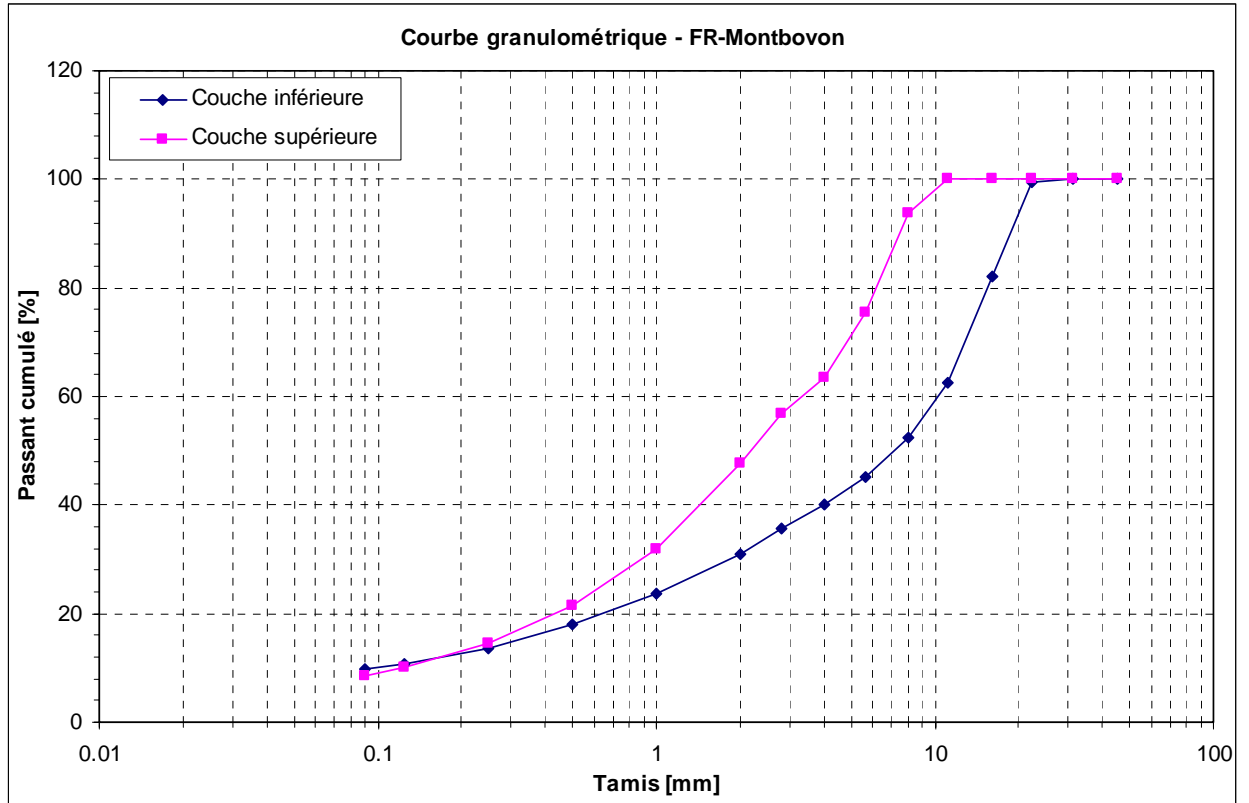
## 10.2 Courbes granulométriques

### 10.2.1 FR – Kleingurmels

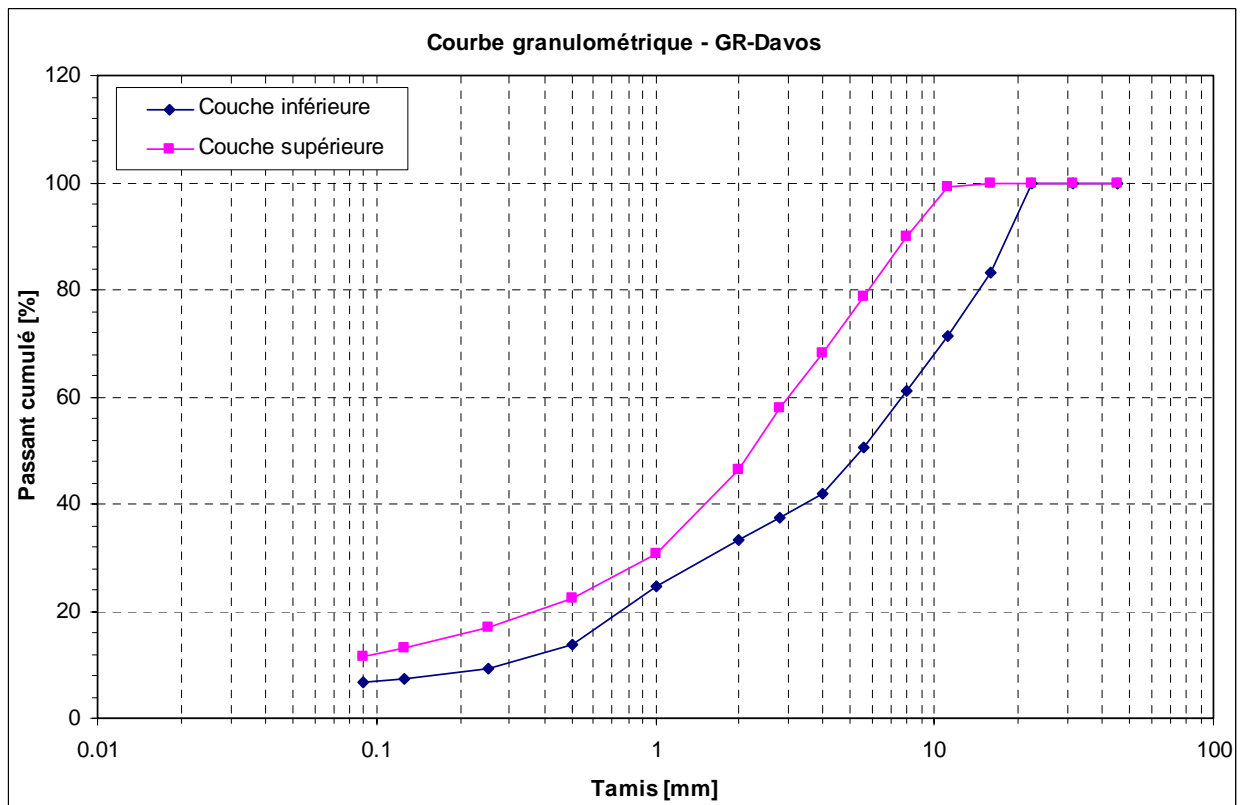




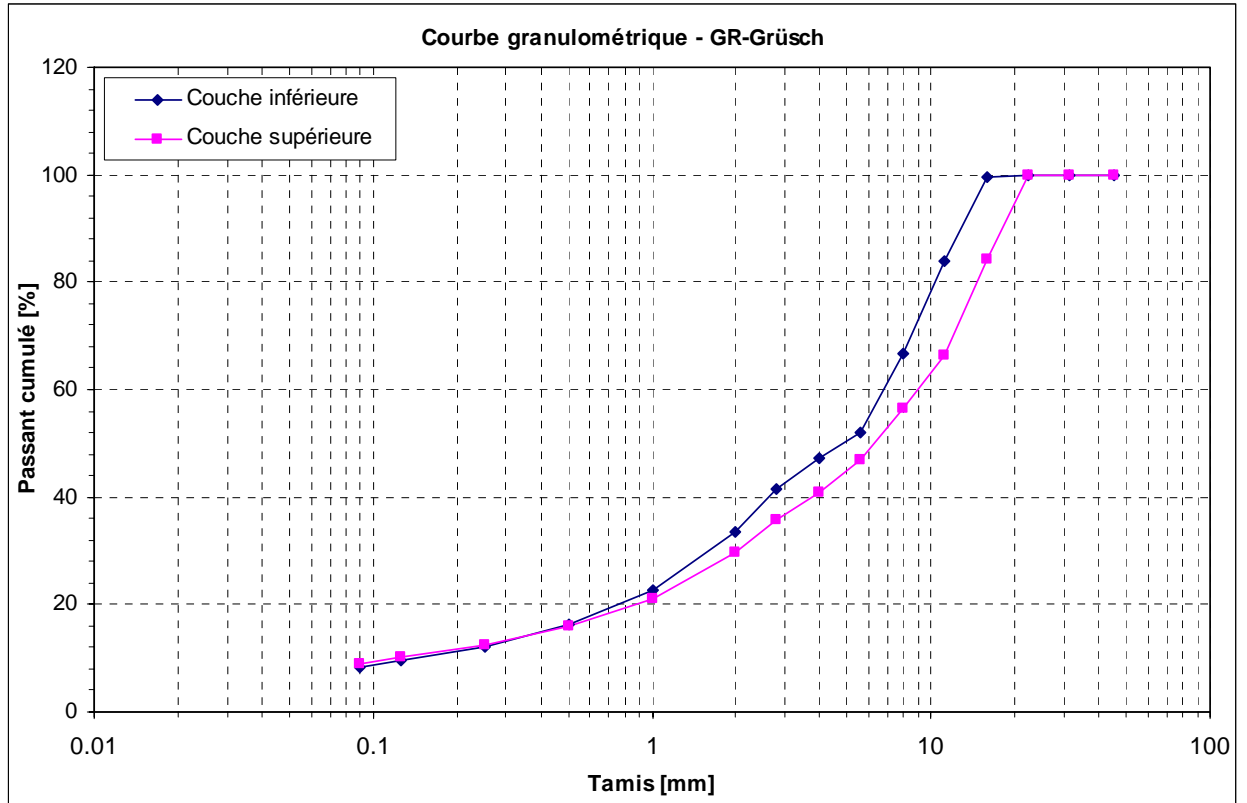
## 10.2.2 FR – Montbovon



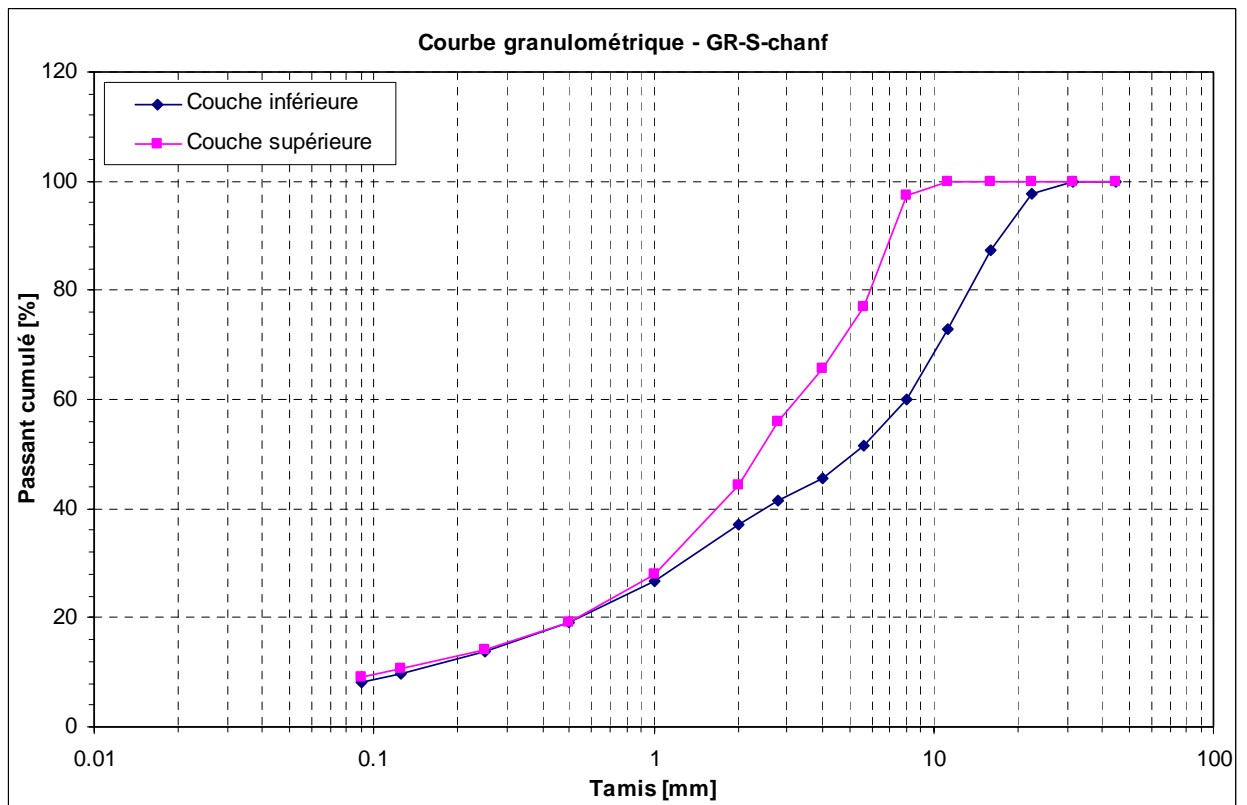
## 10.2.3 GR – Davos



## 10.2.4 GR – Grüşch

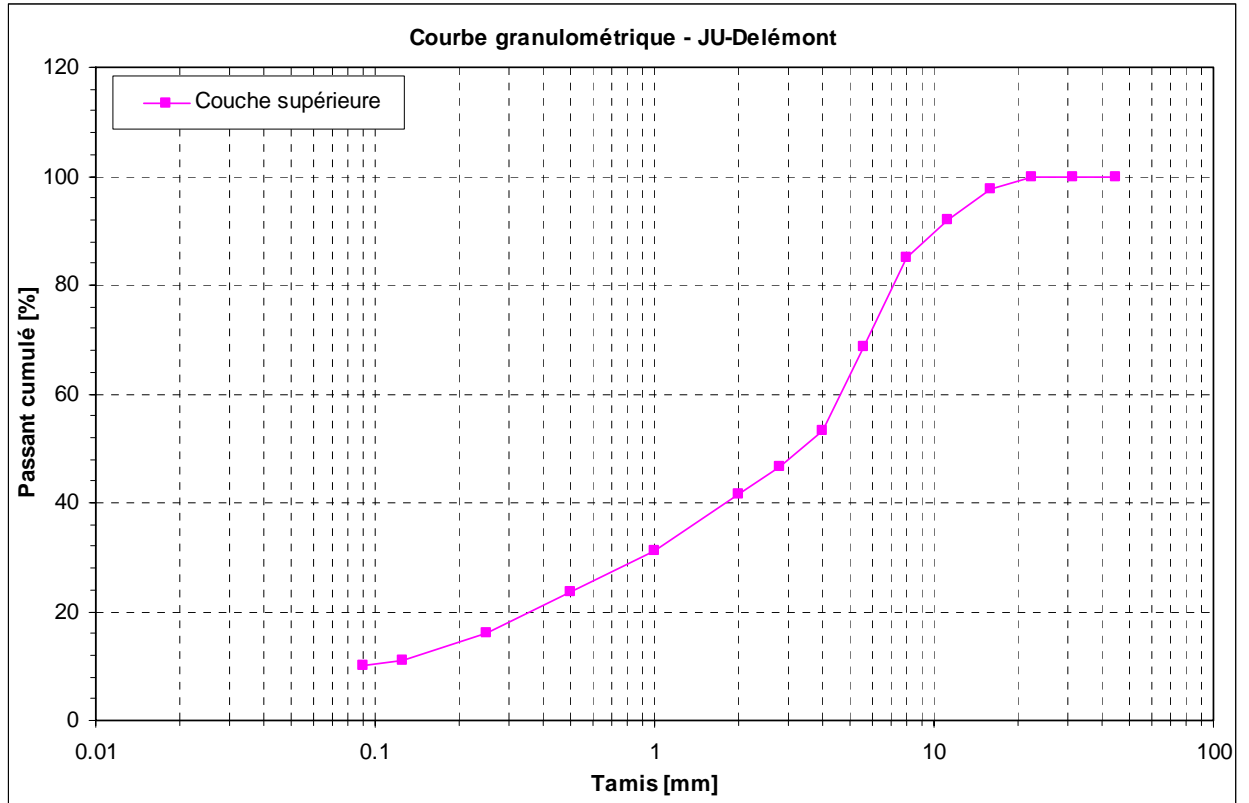


## 10.2.5 GR – S-chanf

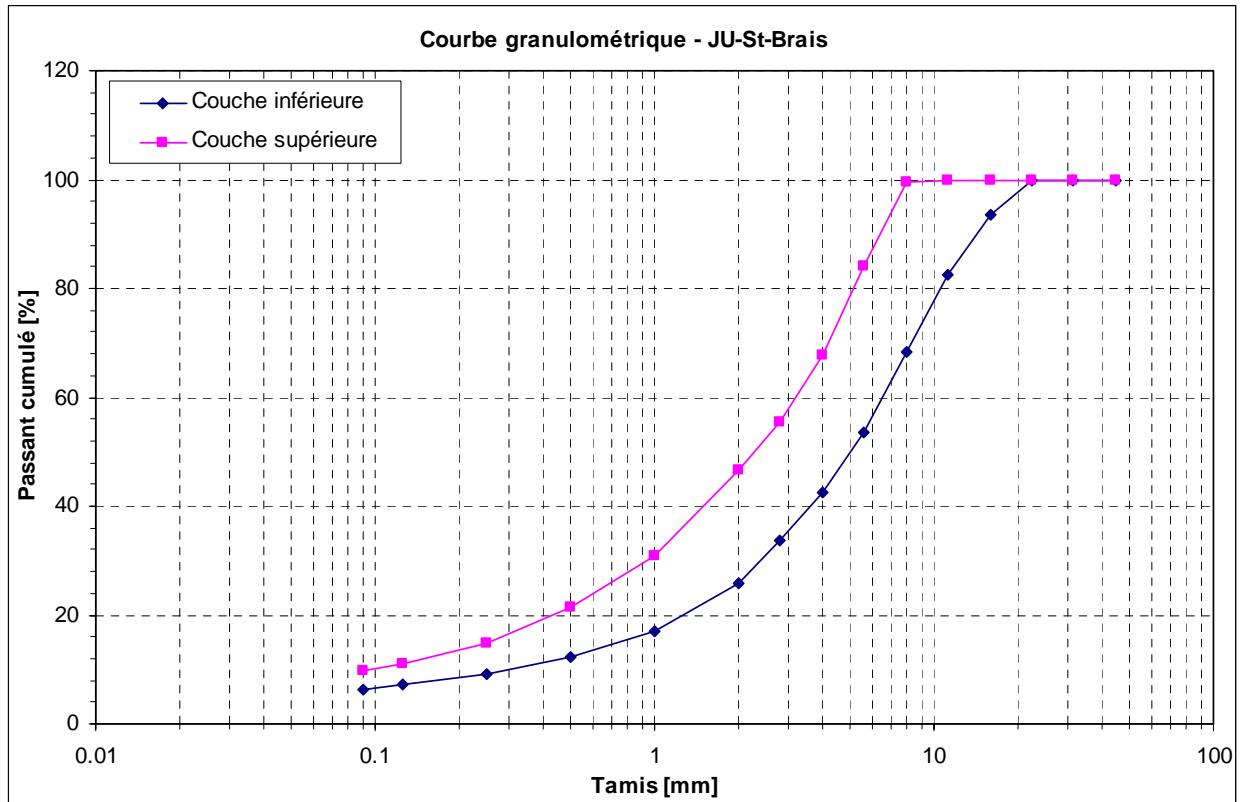




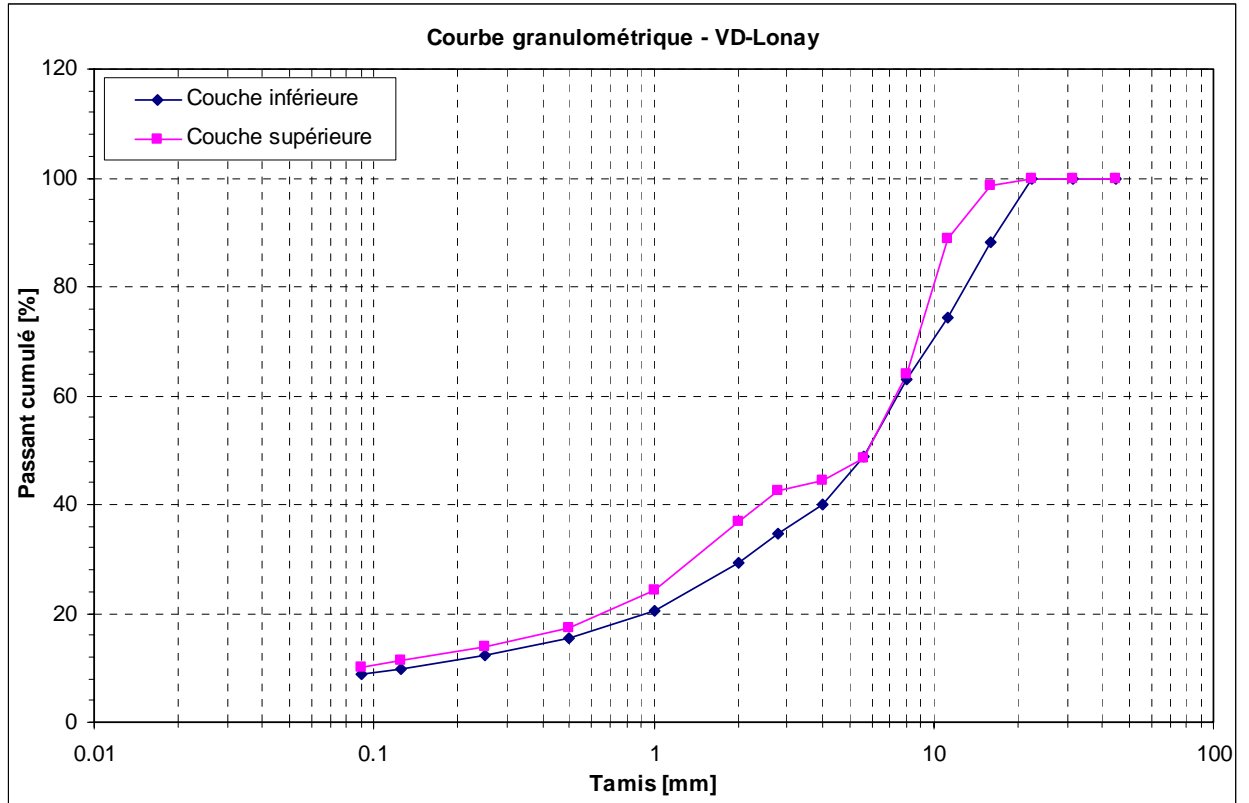
## 10.2.6 JU – Delémont



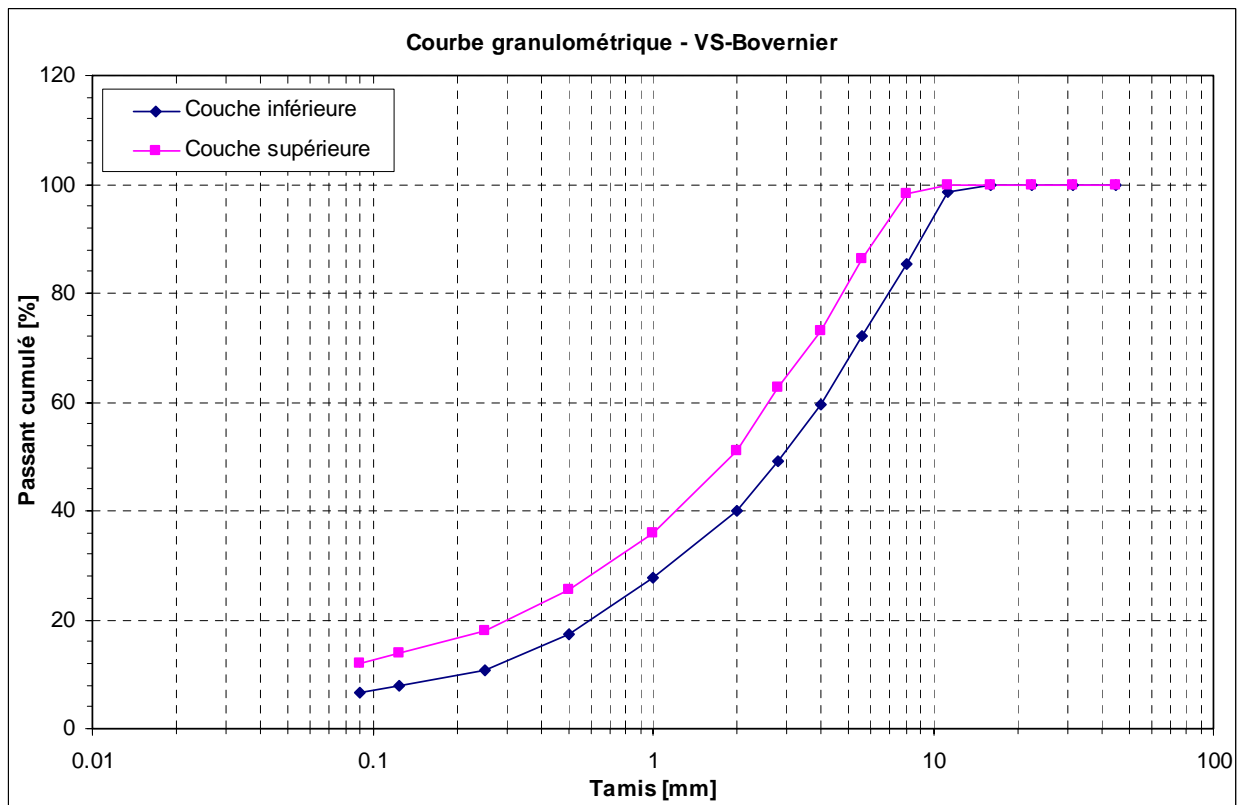
## 10.2.7 JU – St-Brais



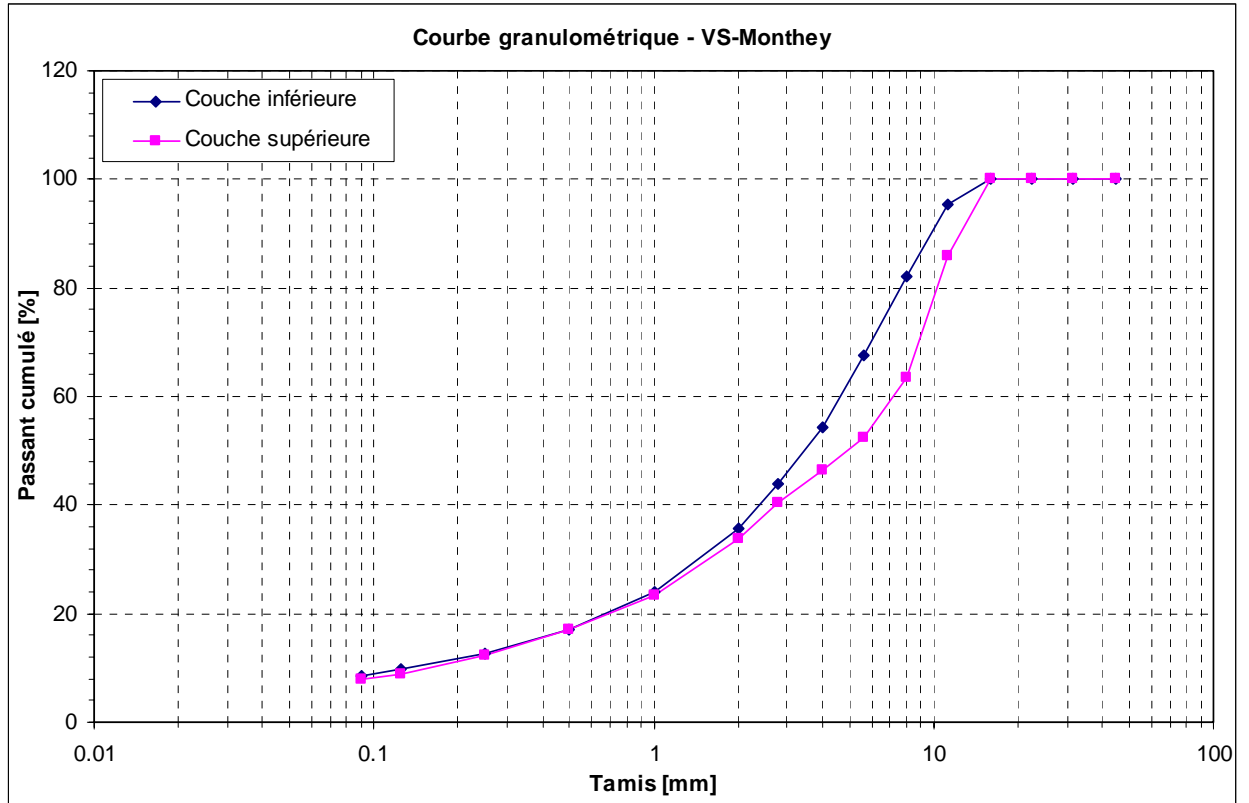
## 10.2.8 VD – Lonay



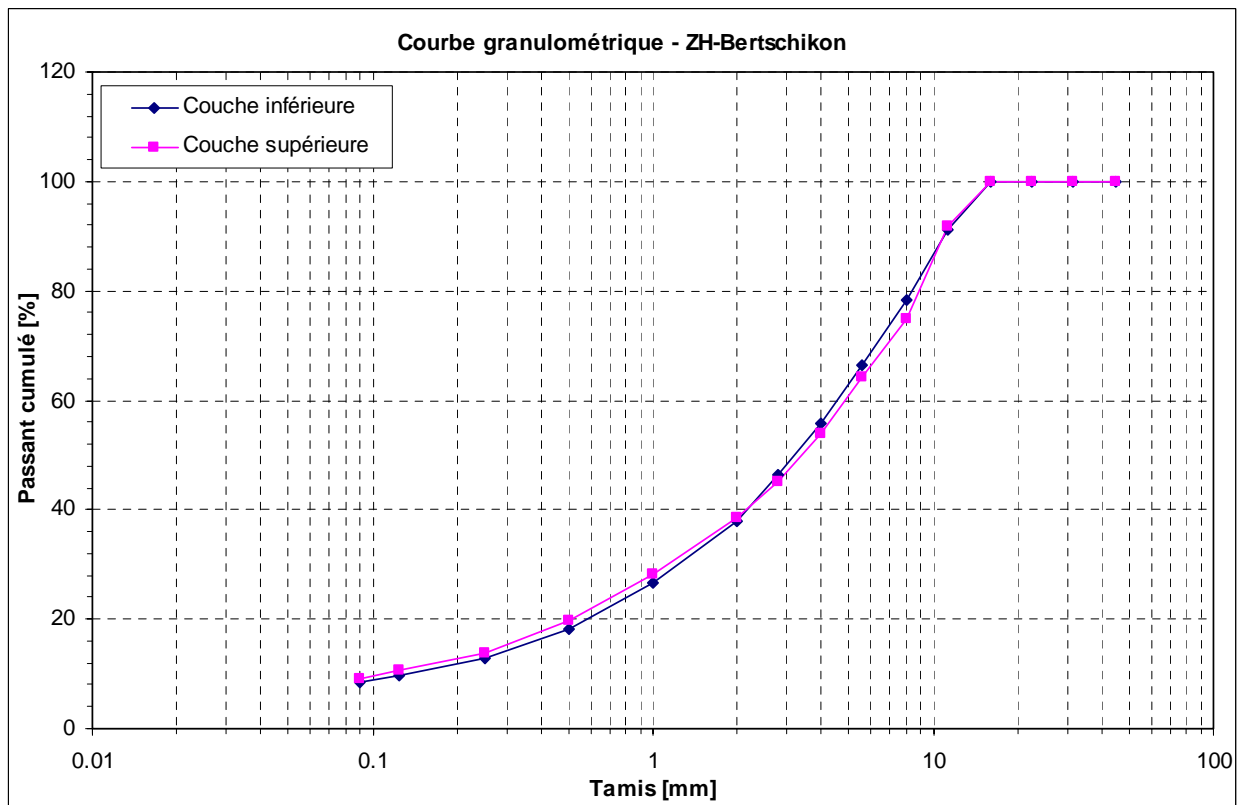
## 10.2.9 VS – Bovernier



## 10.2.10 VS – Monthey



## 10.2.11 ZH – Bertschikon



## 10.3 Résultats numériques de l'ornièreur LPC

### 10.3.1 FR – Kleingurmels

Ornièreur LPC - Ornière [%] FR - Kleingurmels												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
60.2	50	0.4	0.7	1.2	1.7	2.4	3.0	3.4	3.9	4.1	4.5	4.7
64.2	50	0.4	0.7	1.2	1.7	2.4	2.9	3.5	3.9	4.1	4.4	4.7
66.2	50	0.7	1.0	1.5	2.4	4.1	5.0	5.3	5.7	6.1	6.3	6.6
61.2	55	0.7	1.1	1.6	3.1	4.7	6.2	7.2	8.0	8.8	9.4	10.2
63.2	55	0.8	1.5	2.5	5.9	8.5	10.5	11.9	13.0	14.1	14.9	
67.2	55	0.8	1.2	3.1	4.1	5.3	5.9	6.5	6.9	7.1	7.6	7.9
61.1	60	1.0	1.7	2.9	7.0	10.9	13.7	15.8				
65.1	60	1.0	1.6	2.5	5.9	8.3	9.6	10.4	11.6	12.6	13.2	13.6
67.1	60	1.2	1.9	3.3	6.0	10.2	12.0	13.7	15.0			

Ornièreur LPC - Ornière [%] FR - Kleingurmels													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
60.2	50	5.0	5.2	6.3	7.3	8.0	8.5	9.1	9.7	10.0	10.3	10.7	11.0
64.2	50	4.9	5.1	5.7	6.1	6.4	6.5	6.8	7.2	7.2	7.4	7.4	7.6
66.2	50	6.9	7.1	7.9	8.5	9.2	9.6	10.1	10.6	11.1	11.2	11.4	11.7
61.2	55	10.4	10.9	12.9	14.0								
63.2	55												
67.2	55	8.1	8.4	9.7	10.5	10.9	11.6	11.7	11.9	12.2	12.3	12.5	12.6
61.1	60												
65.1	60	14.1											
67.1	60												

### 10.3.2 FR – Montbovon

Ornièreur LPC - Ornière [%] FR - Montbovon												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
97.1	45	0.4	0.8	1.1	2.2	2.7	3.4	3.8	4.2	4.5	4.7	5.3
101.1	45	0.4	0.8	0.9	1.7	1.9	2.5	2.8	2.8	3.0	3.1	3.5
12.2	45	0.6	1.0	1.3	2.0	2.4	2.7	2.9	3.1	3.3	3.6	3.7
96.2	50	0.8	1.3	2.0	2.9	3.5	4.2	4.6	4.9	5.1	5.3	5.7
100.2	50	1.2	1.9	3.1	4.5	5.7	6.6	7.1	7.7	8.2	8.5	8.9
103.1	50	0.7	1.0	1.5	2.3	3.0	3.4	3.9	4.2	4.6	4.9	5.2
97.2	55	1.0	1.8	3.5	7.1	10.6	13.2	16.2	18.5			
100.1	55	0.8	1.4	2.9	5.6	8.2	10.4	13.3	15.8	17.1		
103.2	55	0.4	1.2	1.9	4.0	5.3	7.2	8.6	9.6	10.8	12.1	13.2

Ornièreur LPC - Ornière [%] FR - Montbovon													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
97.1	45	5.5	5.7	6.6	7.6	7.8	8.3	8.9	9.2	9.5	9.7	10.0	10.7
101.1	45	3.6	3.7	4.3	4.7	5.1	5.4	5.8	6.1	6.3	6.6	6.8	6.9
12.2	45	3.9	4.0	4.6	5.0	5.3	5.8	6.0	6.2	6.4	6.7	6.8	7.0
96.2	50	5.9	6.2	7.9	9.2	10.5	11.4	12.2	12.7	13.0	14.0	14.4	15.0
100.2	50	9.4	9.7	13.4	16.0	18.2							
103.1	50	5.7	6.2	8.4	9.6	11.2	12.6	13.6	15.2	15.8	16.8	17.6	17.9
97.2	55												
100.1	55												
103.2	55	14.1	15.1										

## 10.3.3 GR – Davos

Ornièreur LPC - Ornière [%] GR - Davos												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
88.1	40	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	1.8	1.9	2.2	2.2	2.4	2.6
91.1	40	0.7	1.0	1.4	1.9	2.4	2.6	2.9	3.2	3.3	3.4	3.6
93.2	40	0.5	0.8	1.3	1.7	2.0	2.3	2.6	2.7	2.9	3.1	3.2
88.2	45	0.6	1.1	1.7	2.5	3.5	4.5	5.2	5.8	6.3	6.7	7.2
90.2	45	0.6	1.1	1.7	2.7	3.9	4.7	5.3	5.8	6.4	6.8	7.2
94.2	45	0.7	1.2	1.6	2.3	3.1	3.7	4.2	4.6	5.0	5.4	5.8
87.2	50	0.5	1.1	1.8	2.9	5.1	7.0	8.2	9.4	10.1	10.8	11.3
91.2	50	0.7	1.3	2.3	6.1	7.2	10.0	12.6	15.2	16.9		
94.1	50	1.0	1.5	2.4	4.4	7.3	9.0	10.8	12.8	13.9	14.7	15.4

Ornièreur LPC - Ornière [%] GR - Davos													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
88.1	40	2.6	2.8	3.2	3.6	3.9	4.2	4.6	4.7	5.0	5.1	5.3	5.5
91.1	40	3.7	4.0	4.7	5.5	5.9	6.0	6.7	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
93.2	40	3.3	3.4	4.4	5.1	5.6	6.1	6.3	6.6	6.9	7.2	7.4	7.6
88.2	45	7.8	8.0	9.6	11.0	11.8	12.6	13.6	14.7	14.9			
90.2	45	7.6	7.8	9.5	10.7	12.1	13.1	13.8	15.1	15.8			
94.2	45	6.2	6.5	7.5	8.4	9.2	9.9	10.9	11.9	12.8	13.3	13.8	14.6
87.2	50	12.1	12.6	16.3									
91.2	50												
94.1	50												

## 10.3.4 GR – Grüşch

Ornièreur LPC - Ornière [%] GR - Grüşch												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
78.2	50	0.3	0.6	1.0	1.6	2.0	2.7	3.1	3.3	3.4	3.8	4.1
82.2	50	0.4	0.7	1.3	1.7	2.1	2.7	3.0	3.3	3.4	3.7	4.0
84.2	50	0.6	1.1	1.4	2.2	2.7	3.3	3.9	3.9	4.3	4.6	4.7
79.1	55	0.6	1.2	1.7	2.6	3.5	4.1	4.7	5.1	5.6	6.0	6.4
81.2	55	1.3	1.8	2.3	3.4	4.0	4.5	5.0	5.4	5.6	5.9	6.2
85.2	55	0.3	0.8	1.4	2.2	2.9	3.5	4.0	4.5	4.8	5.1	5.3
79.2	60	0.5	1.0	1.5	2.8	4.4	5.2	6.1	6.7	7.5	7.8	8.6
82.1	60	0.5	1.2	2.3	5.1	8.2	10.5	12.4	14.2	14.8		
85.1	60	0.6	1.3	2.1	3.7	5.6	6.8	8.1	9.0	9.8	10.8	11.7

Ornièreur LPC - Ornière [%] GR - Grüşch													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
78.2	50	4.2	4.4	5.3	5.9	6.7	7.0	7.4	7.6	7.9	8.0	8.1	8.3
82.2	50	4.1	4.6	5.1	6.0	6.7	7.4	7.6	7.9	8.3	8.4	8.5	8.6
84.2	50	4.9	5.1	5.8	6.3	6.9	7.2	7.5	7.7	8.1	8.4	8.6	8.8
79.1	55	6.5	6.8	7.9	9.2	9.6	10.4	10.9	11.4	11.8	11.9	12.2	12.6
81.2	55	6.3	6.7	8.0	8.9	9.3	10.1	10.7	11.4	11.7	11.8	12.2	12.5
85.2	55	5.6	5.9	7.1	7.7	8.2	8.7	9.1	9.5	9.8	10.0	10.3	10.7
79.2	60	9.0	9.3	12.2	13.9	15.3							
82.1	60												
85.1	60	12.1	12.7	15.4									

## 10.3.5 GR – S-chanf

Orniéreur LPC - Ornière [%] GR - S-chanf													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
70.2	40	0.3	0.6	0.8	1.5	2.0	2.6	3.2	3.6	3.8	4.2	4.4	4.7
73.1	40	0.3	0.6	0.9	1.4	1.9	2.4	2.8	3.1	3.3	3.7	3.9	4.1
76.2	40	0.4	0.6	1.1	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.1	4.5	4.7	5.1
69.2	45	0.7	1.0	1.3	2.6	3.9	4.8	5.5	6.2	6.8	7.5	8.1	8.7
74.1	45	0.5	0.8	1.4	3.0	4.9	6.4	7.5	8.8	9.8	10.8	11.7	12.3
72.2	45	0.4	0.8	1.6	2.0	2.9	3.7	4.4	4.9	5.4	5.9	6.5	6.9
70.1	50	0.5	1.0	2.4	5.3	9.5	14.1	16.6					
73.1	50	0.7	1.3	2.6	3.8	8.0	12.0	15.1	18.3				
73.1	50	0.8	1.4	2.2	4.7	8.4	10.2	12.5	14.4	16.0			

Orniéreur LPC - Ornière [%] GR - S-chanf														
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles												
		10000	15000	20000	25000	28000	30000	35000	37000	40000	45000	50000	55000	60000
70.2	40	4.9	6.2	7.2	8.4		9.2	10.0		10.5	10.9	11.4	11.8	12.5
73.1	40	4.4	5.5	6.2	7.0		7.8	8.3		8.7	9.1	9.5	9.8	10.3
76.2	40	5.4	7.1	8.4	9.4		9.9	10.7		11.5	12.2	12.7	13.3	13.7
69.2	45	9.0	11.4	14.4	17.0	18.3								
74.1	45	12.9	16.3											
72.2	45	7.4	8.7	12.2	14.6		16.1	17.0	17.4					
70.1	50													
73.1	50													
73.1	50													

## 10.3.6 JU – Delémont

Orniéreur LPC - Ornière [%] JU - Delémont												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
48.1	40	0.1	0.4	0.8	1.3	1.8	2.4	2.9	3.2	3.6	3.9	4.3
43.1	40	0.2	0.5	0.9	1.4	2.0	2.5	3.0	3.4	3.7	4.0	4.3
44.2	40	0.3	0.7	1.0	1.8	2.5	3.1	3.5	4.0	4.3	4.6	4.9
42.2	45	0.4	0.9	1.4	3.0	4.6	5.8	6.9	7.8	8.7	9.5	10.4
48.2	45	0.6	1.1	1.8	3.5	4.9	6.2	7.2	7.7	8.6	9.5	10.4
45.1	45	1.1	1.7	2.5	4.2	6.1	7.8	9.1	10.4	11.4	12.3	13.1
45.2	50	0.2	0.8	1.8	6.0	10.8	14.2	16.9				
42.1	50	0.4	1.0	1.9	6.0	10.5	13.4	15.8				
47.2	50	1.1	2.1	3.4	6.9	10.1	13.4	16.5				

Orniéreur LPC - Ornière [%] JU - Delémont													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
48.1	40	4.5	4.8	6.1	7.4	8.2	8.8	9.5	10.0	10.5	11.0	11.3	11.9
43.1	40	4.6	4.8	6.0	6.9	7.9	8.5	9.1	9.4	10.0	10.6	11.0	11.3
44.2	40	5.2	5.5	6.6	7.6	8.5	9.4	10.0	10.5	11.1	11.5	12.0	12.2
42.2	45	11.2	12.0	15.5									
48.2	45	11.4	12.3	17.1									
45.1	45	13.9	14.6	18.6									
45.2	50												
42.1	50												
47.2	50												

## 10.3.7 JU – St-Brais

Ornièreur LPC - Ornière [%] JU - St-Brais												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
52.1	50	1.2	1.7	2.1	2.5	3.0	3.2	3.4	3.6	3.7	3.9	3.9
55.2	50	0.2	0.3	0.7	1.0	1.5	1.7	1.8	1.9	1.9	2.1	2.1
58.1	50	1.5	1.8	2.2	2.8	3.1	3.3	3.6	3.6	3.7	3.8	3.9
51.2	55	1.6	2.2	2.6	3.5	4.1	4.4	4.6	4.9	5.1	5.2	5.2
55.1	55	1.0	1.5	1.7	2.5	3.0	3.2	3.4	3.6	3.6	3.7	3.7
58.2	55	1.3	1.9	2.5	3.4	3.7	3.9	4.1	4.3	4.6	4.6	4.7
52.2	60	1.5	2.2	2.5	3.7	4.1	4.3	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8
56.2	60	1.3	1.9	2.0	3.1	3.7	4.0	4.1	4.3	4.3	4.4	4.5
59.1	60	1.1	1.5	2.0	2.7	3.4	3.5	3.7	3.8	4.0	4.0	4.2

Ornièreur LPC - Ornière [%] JU - St-Brais													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
52.1	50	4.0	4.1	4.5	4.6	4.7	4.9	4.9	5.0	5.1	5.2	5.2	5.3
55.2	50	2.1	2.3	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.3	3.3	3.3
58.1	50	4.0	4.1	4.2	4.4	4.4	4.6	4.6	4.8	4.8	4.9	5.0	5.0
51.2	55	5.3	5.3	5.6	5.8	6.1	6.1	6.2	6.3	6.6	6.6	6.6	6.9
55.1	55	3.7	3.8	4.1	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.6	4.6	4.8
58.2	55	4.7	4.7	5.3	5.5	5.7	5.8	5.9	5.8	5.9	5.9	6.0	6.0
52.2	60	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	5.9	6.1	6.2	6.4	6.5	6.6
56.2	60	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.7	5.7	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3
59.1	60	4.1	4.2	4.4	4.7	4.8	4.9	5.2	5.4	5.3	5.5	5.6	5.8

## 10.3.8 VD – Lonay

Ornièreur LPC - Ornière [%] VD - Lonay											
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles									
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
12.1	45	0.4	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	2.1	2.4	2.5	2.6
14.2	45	0.4	0.7	1.2	1.6	2.0	2.3	2.5	2.7	2.7	2.8
19.1	45	0.4	0.8	1.1	1.5	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
15.2	50	0.9	1.5	2.2	2.8	3.6	4.0	4.2	4.6	4.8	5.1
11.1	50	0.5	0.9	1.3	1.5	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.7
18.2	50	0.7	1.0	1.5	2.0	2.6	3.0	3.1	3.4	3.5	3.8
18.1	55	0.8	1.2	1.5	1.9	2.2	2.3	2.4	2.7	2.7	2.7
11.2	55	0.4	0.9	1.5	2.2	3.0	4.1	4.7	5.3	5.6	6.0
16.1	55	0.7	1.1	1.3	1.6	1.9	2.1	2.2	2.2	2.4	2.4
15.1	60	0.9	1.6	2.3	3.3	4.4	4.8	5.2	5.6	5.9	6.1
12.2	60	1.1	1.8	2.8	4.4	6.0	7.1	7.8	8.3	8.9	9.4
17.2	60	0.4	1.1	1.8	3.5	5.6	7.2	8.4	9.8	10.7	11.2

Ornièreur LPC - Ornière [%] VD - Lonay											
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles									
		8000	9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000
12.1	45	2.7	2.8	2.8	3.1	3.3	3.5	3.7	3.8	3.9	4.0
14.2	45	3.0	3.0	3.2	3.4	3.7	3.9	4.1			
19.1	45	2.9	3.0	3.0	3.3	3.5	3.7	3.8			
15.2	50	5.3	5.4	5.6	6.1	6.9	7.3	7.5	7.8	8.1	8.4
11.1	50	2.8	2.9	3.0	3.3	3.5	3.6	3.9			
18.2	50	3.9	4.0	4.2	4.5	4.8	5.2	5.3			
18.1	55	2.8	2.8	3.0	3.0	3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.4
11.2	55	6.4	6.7	6.9	9.3	10.5	11.4	12.4	12.8	13.1	13.6
16.1	55	2.4	2.6	2.6	2.8	2.9	3.0	3.0			
15.1	60	6.4	6.5	6.6	7.4	8.0	8.4	8.6	8.9	9.0	9.1
12.2	60	9.8	10.3	10.6	11.9	13.4	14.2	15.0			
17.2	60	12.0	12.7	13.2	17.9	20.7					

Ornièreur LPC - Ornière [%]												
VD - Lonay												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		50000	55000	60000	65000	70000	75000	80000	85000	90000	95000	100000
12.1	45	4.1	4.2	4.2	4.3	4.4	4.4	4.5	4.5	4.6	4.7	4.6
14.2	45											
19.1	45											
15.2	50	8.6	8.8	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8
11.1	50											
18.2	50											
18.1	55	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7	3.6	3.7	3.8	3.7
11.2	55	13.8	13.9	14.0	14.3	14.5	14.6	14.8	14.9	15.0	15.2	15.2
16.1	55											
15.1	60	9.4	9.4	9.6	9.7	9.7	9.8	10.0	10.0	10.0	10.1	10.1
12.2	60											
17.2	60											

### 10.3.9 VS – Bovernier

Ornièreur LPC - Ornière [%]												
VS - Bovernier												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
37.2	45	0.5	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0
39.1	45	0.3	0.6	0.9	1.3	1.5	1.7	2.0	2.1	2.1	2.2	2.4
36.2	45	0.5	0.7	0.9	1.3	1.6	1.7	1.9	2.1	2.1	2.2	2.2
35.1	50	0.3	0.8	1.5	2.5	3.1	3.5	3.8	4.0	4.1	4.2	4.4
35.2	50	0.3	0.6	1.1	1.9	2.3	2.6	2.8	3.0	3.0	3.2	3.3
32.2	50	0.1	0.7	1.2	2.2	2.7	3.2	3.7	3.7	3.9	4.0	4.1
38.2	55	0.8	1.2	1.9	2.8	3.4	3.8	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6
34.2	55	0.5	0.8	1.2	1.9	2.3	2.6	2.7	2.7	2.9	2.9	3.0
33.1	55	0.6	1.1	1.7	3.0	4.5	5.6	6.3	6.9	7.3	7.7	8.1
36.1	60	1.0	1.8	2.8	5.2	7.9	9.6	10.7	11.5	12.0	12.6	13.1
38.1	60	1.1	2.0	3.3	4.3	5.0	5.8	6.2	6.5	6.7	6.9	7.2
32.1	60	0.9	1.6	2.7	4.4	5.7	6.7	7.3	8.0	8.6	9.3	9.8

Ornièreur LPC - Ornière [%]													
VS - Bovernier													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
37.2	45	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.4	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8
39.1	45	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.2	3.3	3.4
36.2	45	2.3	2.3	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.3	3.4	3.5
35.1	50	4.5	4.6	5.0	5.2	5.5	5.6						
35.2	50	3.4	3.5	3.7	3.9	4.0	4.2						
32.2	50	4.2	4.3	4.6	4.8	5.1	5.3						
38.2	55	4.6	4.7	5.2	5.5	5.9	6.0	6.4	6.6	6.8	7.0	7.0	7.1
34.2	55	3.0	3.1	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	4.0	4.0	4.0
33.1	55	8.5	8.7	9.7	10.5	11.5	12.0	12.4	12.8				
36.1	60	13.5	13.9										
38.1	60	7.2	7.4	8.0	8.5	9.0	9.3	9.4	9.6	9.9	10.0	10.1	10.1
32.1	60	10.1	10.5	14.3	18.0								

### 10.3.10 VS – Monthey

Ornièreur LPC - Ornière [%]												
VS - Monthey												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
28.1	40	0.3	0.8	1.1	1.6	2.2	2.6	3.0	3.3	3.5	3.8	3.9
24.2	40	0.4	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5
23.1	40	0.5	0.8	1.2	1.7	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.6	3.7
26.1	45	0.3	0.8	1.4	2.8	3.8	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.8
22.1	45	0.5	1.0	1.7	3.4	4.6	5.5	6.1	6.7	7.1	7.6	7.8
28.2	45	0.4	0.9	1.4	2.8	4.0	4.7	5.4	5.9	6.2	6.5	6.9
25.1	50	0.5	1.4	3.1	6.1	8.9	11.7	13.2	14.7	16.1	16.7	17.3
25.2	50	0.4	1.1	2.6	5.6	8.4	10.2	11.6	12.8	13.6	14.3	15.2
22.2	50	0.1	1.2	3.0	5.8	9.7	13.1					



Orniéreur LPC - Ornière [%] VS - Monthey													
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles											
		9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
28.1	40	4.1	4.2	5.3	5.8	6.0	6.3	6.6	6.8	6.9	7.1	7.2	7.3
24.2	40	3.7	3.8	4.7	5.1	5.4	5.6	5.8	6.0	6.1	6.3	6.4	6.5
23.1	40	3.9	4.0	4.6	5.0	5.4	5.7	6.0	6.2	6.3	6.5	6.6	6.8
26.1	45	6.0	6.2	7.3	7.6	8.1	8.5	9.0	9.2	9.6	9.8	10.0	10.2
22.1	45	8.1	8.5	10.1	10.2	10.7	11.2	11.6	11.9	12.2	12.5	12.7	12.9
28.2	45	7.1	7.3	8.6	9.4	10.0	10.5	11.2	11.3	11.5	11.7	11.8	12.0
25.1	50	18.0											
25.2	50	15.5 15.9											
22.2	50												

## 10.3.11 ZH – Bertschikon

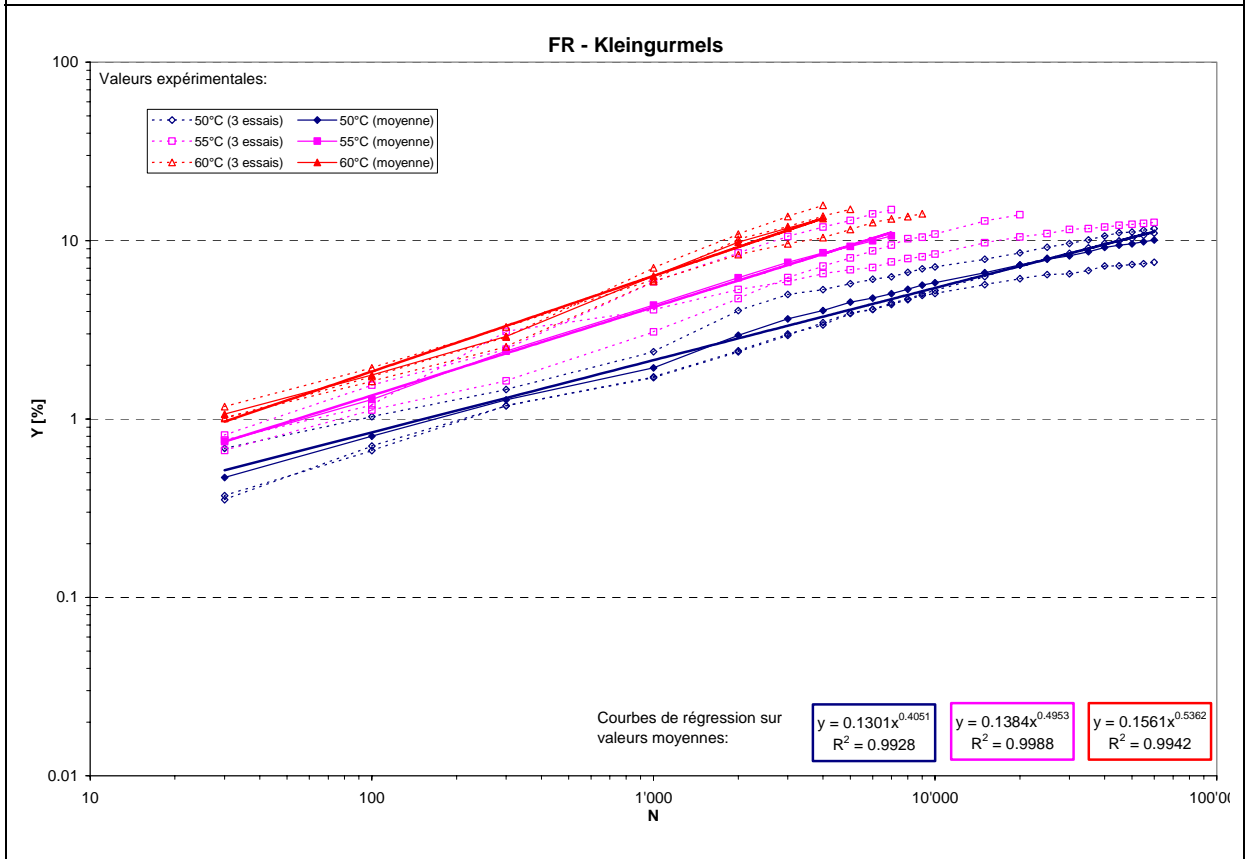
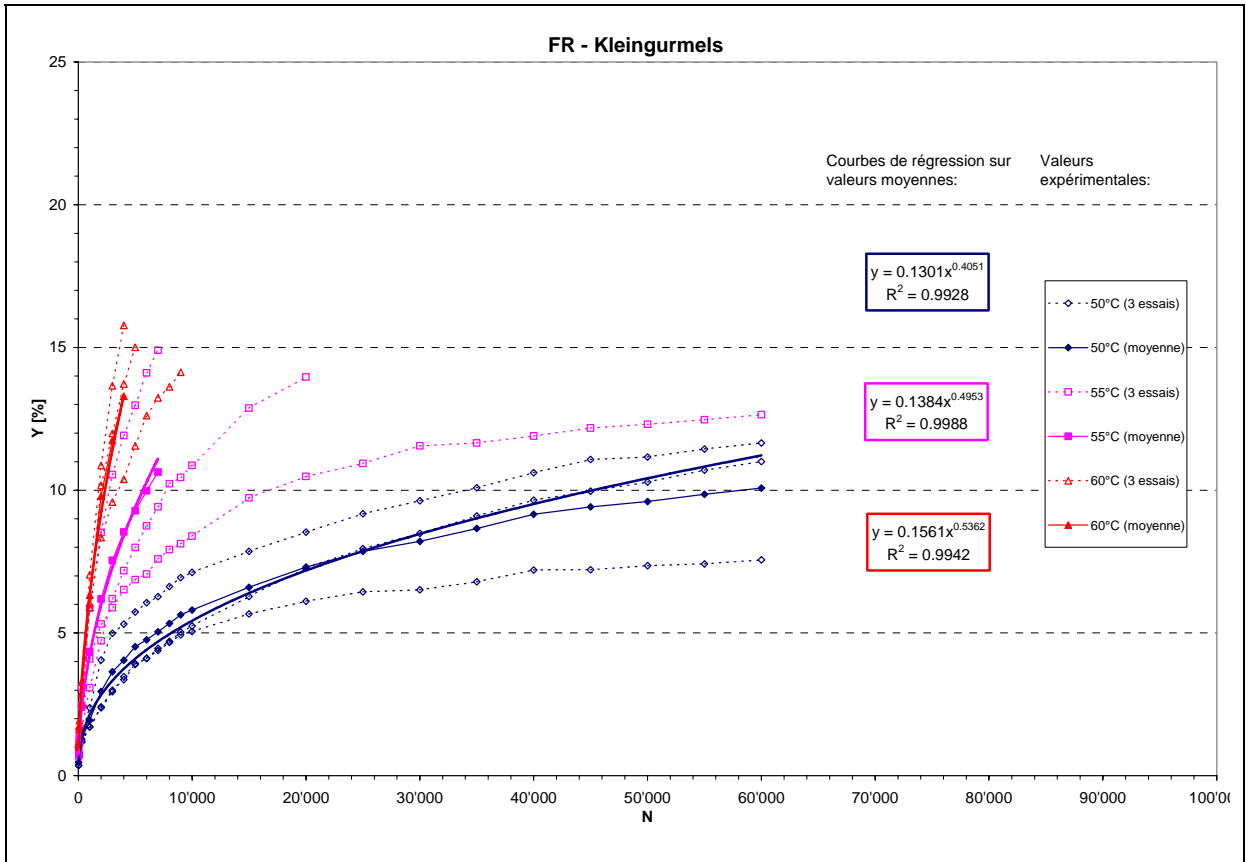
Orniéreur LPC - Ornière [%] ZH - Bertschikon											
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles									
		30	100	300	1000	2000	3000	4000	4800	5000	6000
4.2	40	0.1	0.5	0.7	1.2	1.5	1.7	1.7		2.0	2.2
7.2	40	0.2	0.6	0.8	1.2	1.5	1.7	1.7		1.9	2.2
1.2	40	0.5	0.8	1.2	1.5	1.7	2.3	2.3		2.5	2.8
2.1	45	0.2	0.6	1.0	1.8	2.5	2.9	3.4		3.8	4.2
6.1	45	0.1	0.3	0.9	1.5	2.3	2.7	3.1		3.6	3.9
8.2	45	0.3	0.8	1.3	2.1	2.8	3.3	3.8		4.3	4.8
5.2	50	0.5	1.1	2.0	3.6	5.8	7.1	8.0		8.8	9.7
2.2	50	0.3	0.8	1.4	2.2	3.5	4.5	5.4		5.8	6.2
9.1	50	0.4	1.0	1.5	2.7	3.7	4.9	6.0		7.4	8.1
8.1	55	0.3	1.1	2.4	5.9	10.2	15.2	18.8	20.8		
5.1	55	0.3	1.1	1.9	3.8	6.6	8.6	9.9		11.1	12.4
3.1	55	0.5	1.2	2.5	4.5	7.2	9.1	10.4		11.6	12.7

Orniéreur LPC - Ornière [%] ZH - Bertschikon												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		7000	8000	9000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000
4.2	40	2.2	2.6	2.6	2.8	3.3	3.5	3.9	4.2	4.5	4.8	4.8
7.2	40	2.2	2.5	2.7	2.8	3.3	3.6	4.1	4.3	4.6	4.8	4.8
1.2	40	2.8	2.9	3.1	3.2	3.5	3.9	4.0	4.1	4.3	4.5	4.8
2.1	45	4.3	4.6	4.9	5.0	5.8	6.5	7.2	7.7	8.3	8.7	9.4
6.1	45	4.1	4.4	4.6	4.8	5.7	6.7	7.6	8.6			
8.2	45	5.2	5.5	5.5	5.7	7.1	8.3	9.1	9.8			
5.2	50	10.4	11.3	12.0	12.5	17.6	23.2					
2.2	50	6.7	7.1	7.4	7.7	9.9	14.1	16.3				
9.1	50	8.5	8.9	9.2	9.5	12.2	15.0					
8.1	55											
5.1	55	13.4	14.4	16.0	16.7							
3.1	55	14.0	15.2	16.3	17.3							

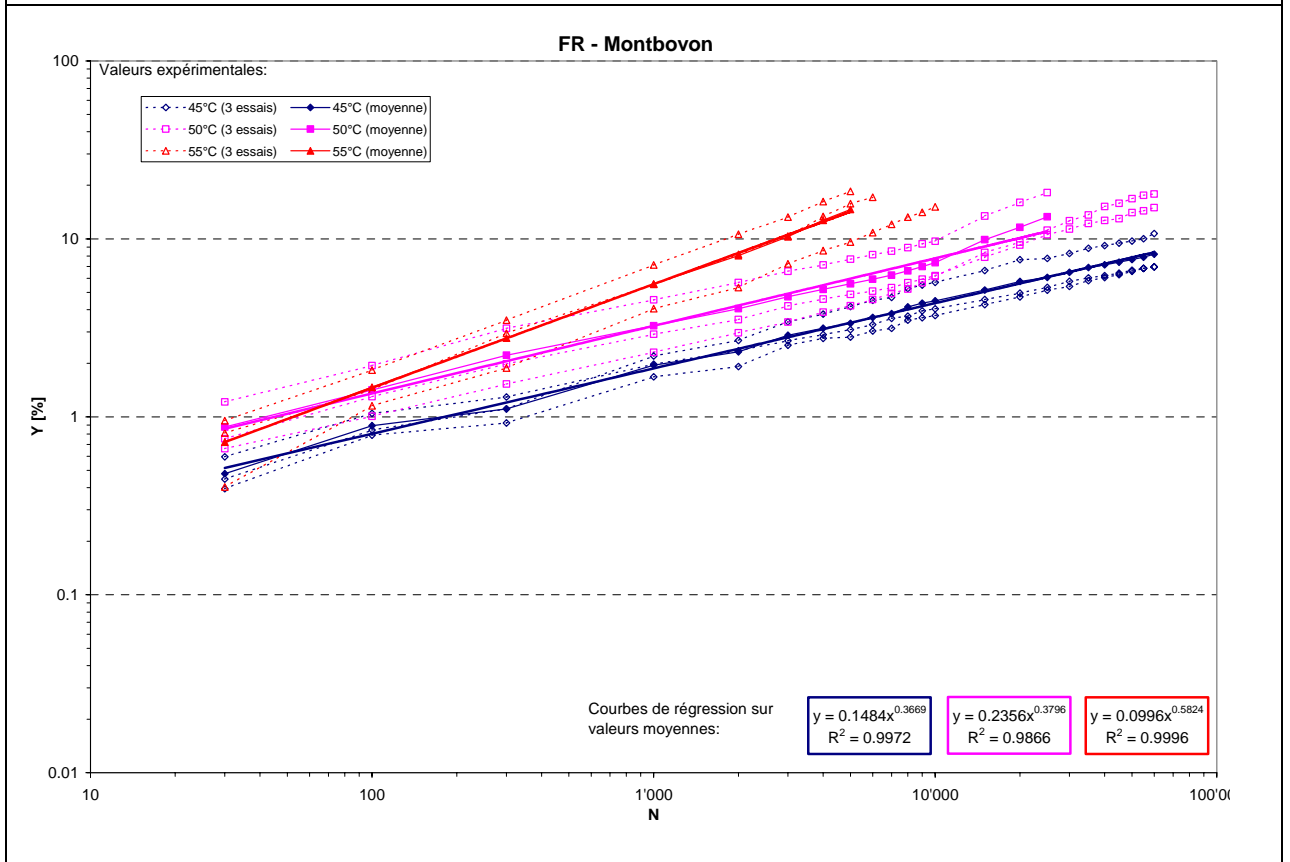
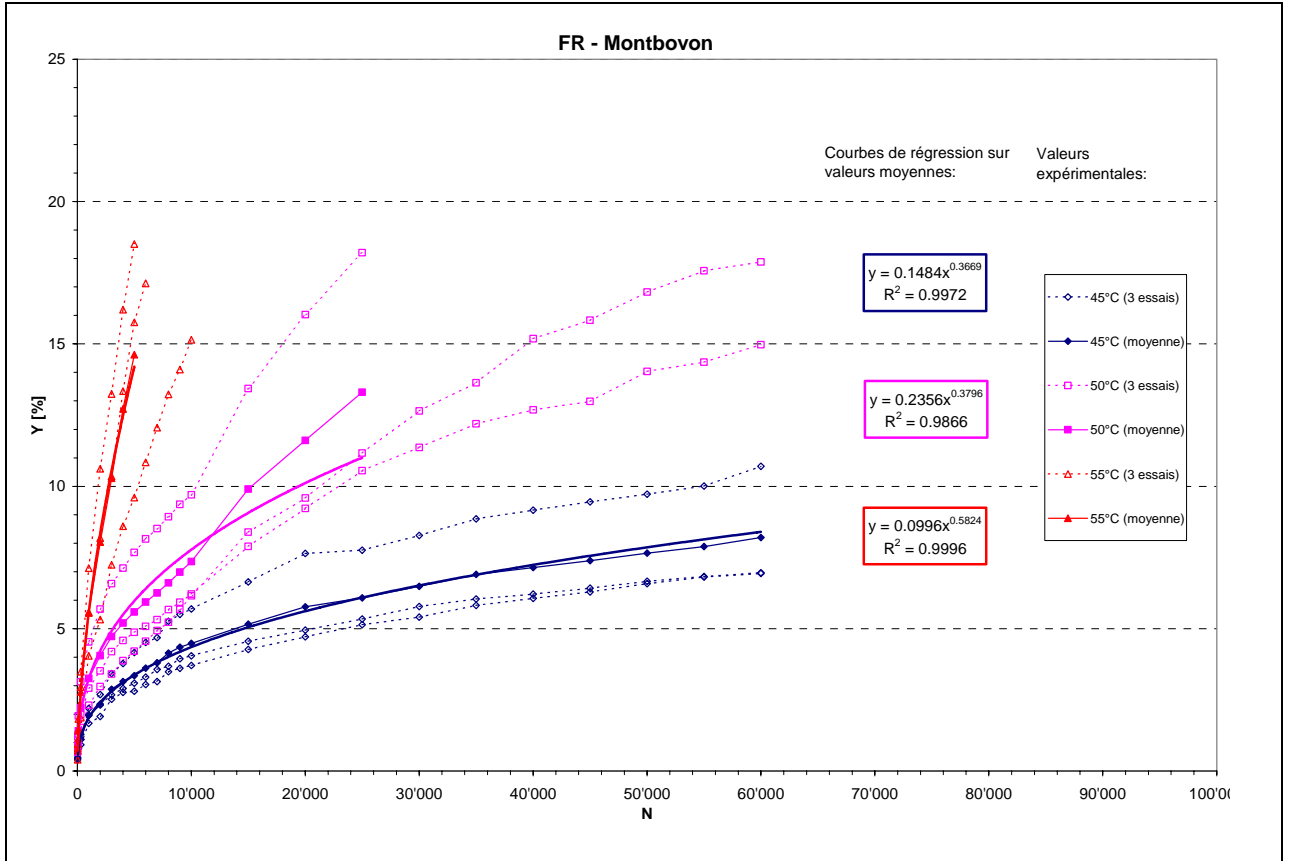
Orniéreur LPC - Ornière [%] ZH - Bertschikon												
Plaque	Temp. [°C]	Nombre de cycles										
		50000	55000	60000	65000	70000	75000	80000	85000	90000	95000	100000
4.2	40	5.0	5.2	5.2								
7.2	40	5.0	5.0	5.1								
1.2	40	4.8	5.0	5.0								
2.1	45	9.8	10.0	10.2	10.4	10.8	10.9	11.0	11.2	11.3	11.5	11.7
6.1	45											
8.2	45											
5.2	50											
2.2	50											
9.1	50											
8.1	55											
5.1	55											
3.1	55											

## 10.4 Courbes d'orniéage

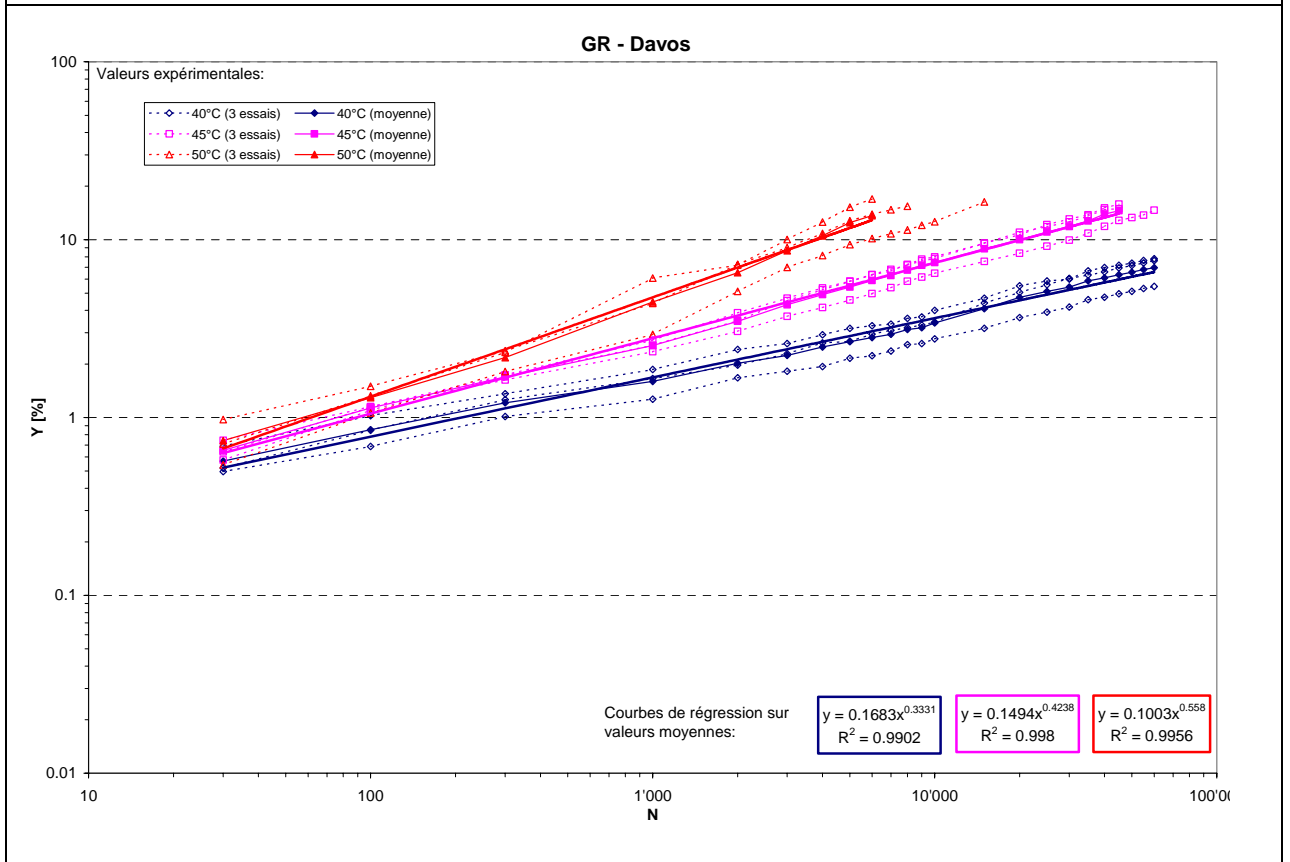
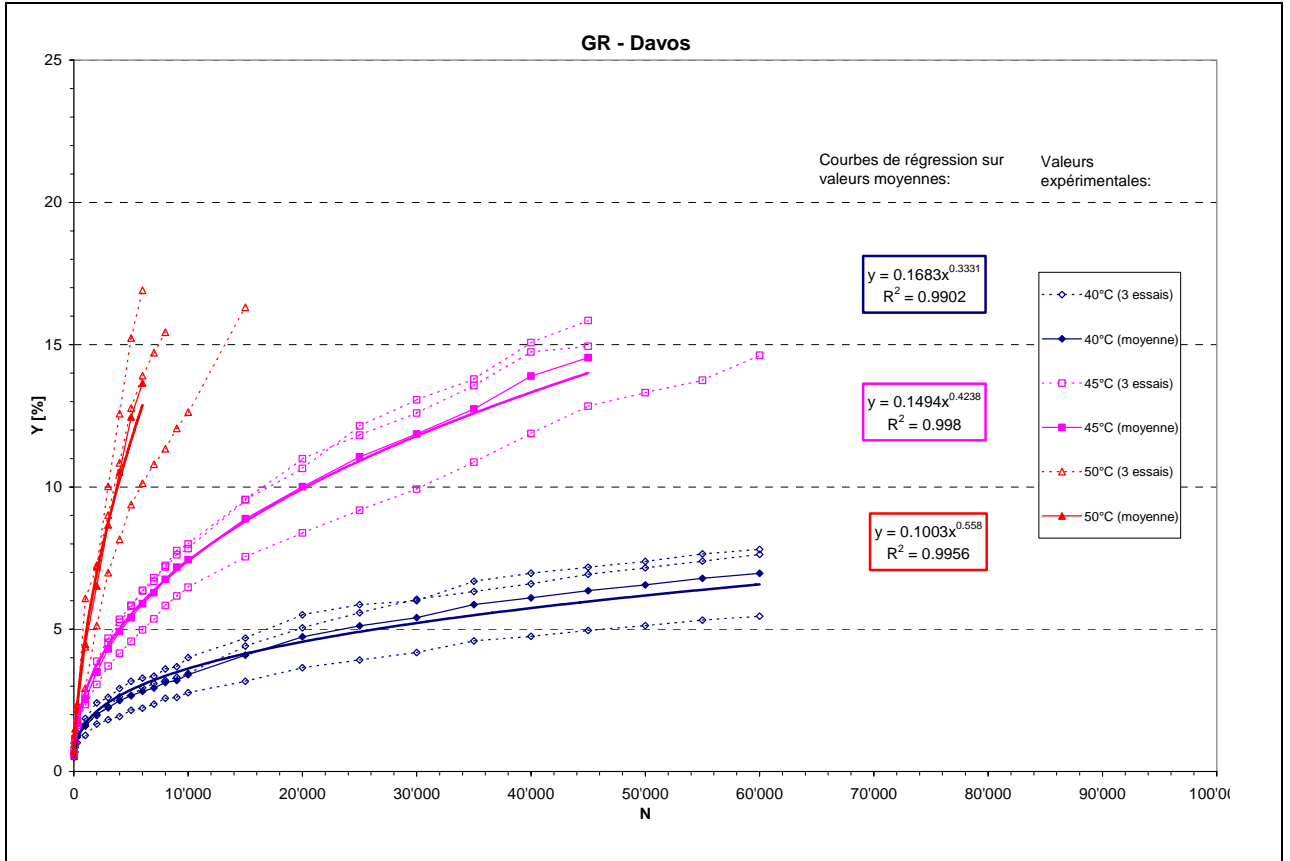
### 10.4.1 FR – Kleingurmels



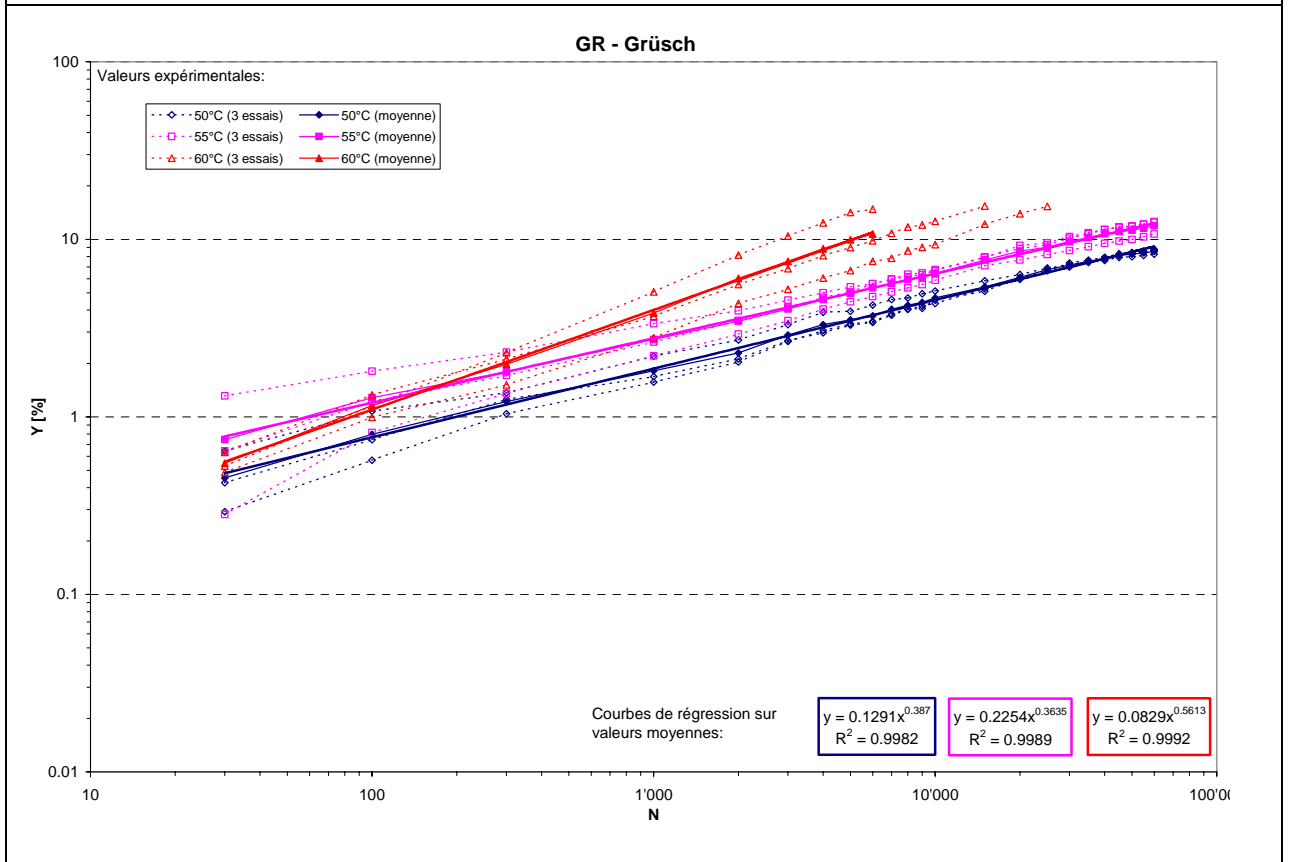
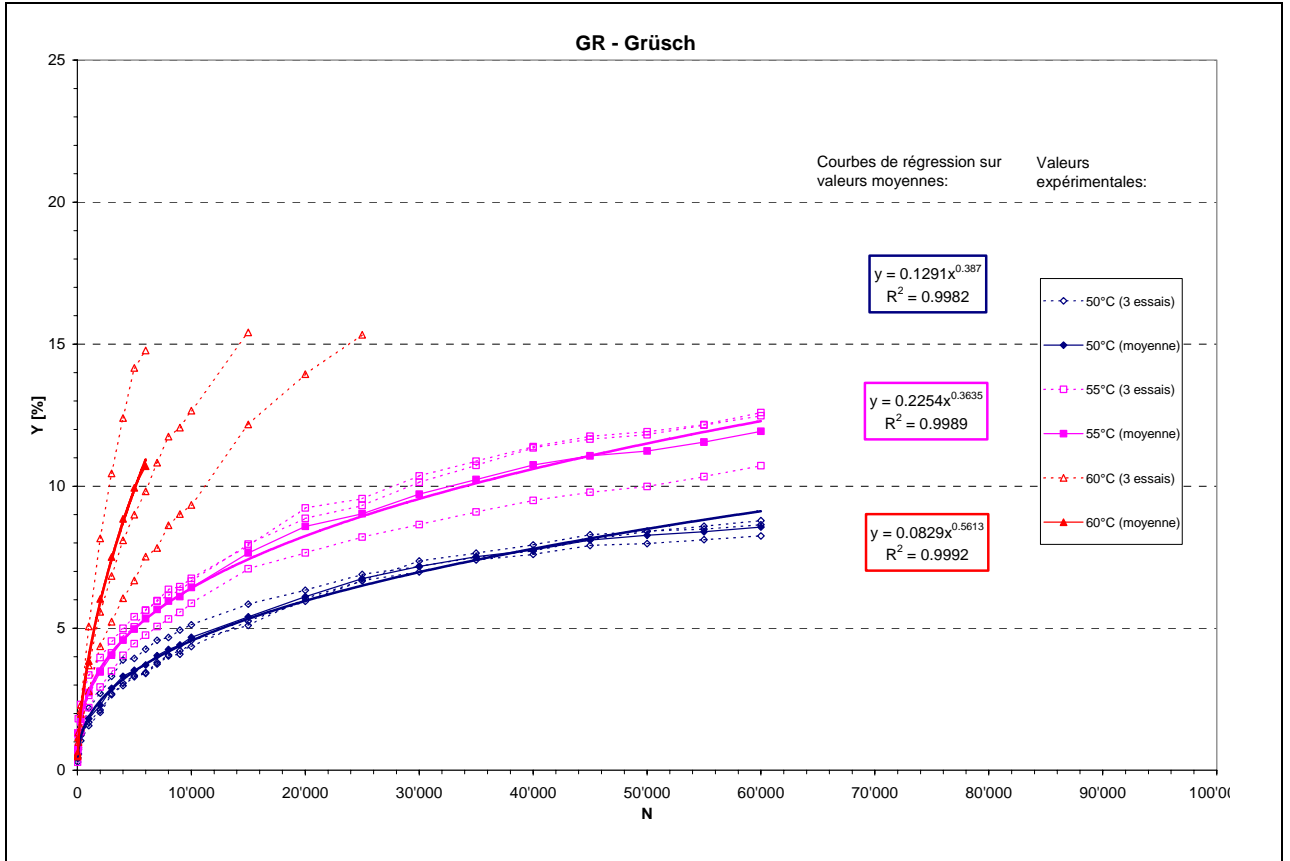
10.4.2 FR – Montbovon



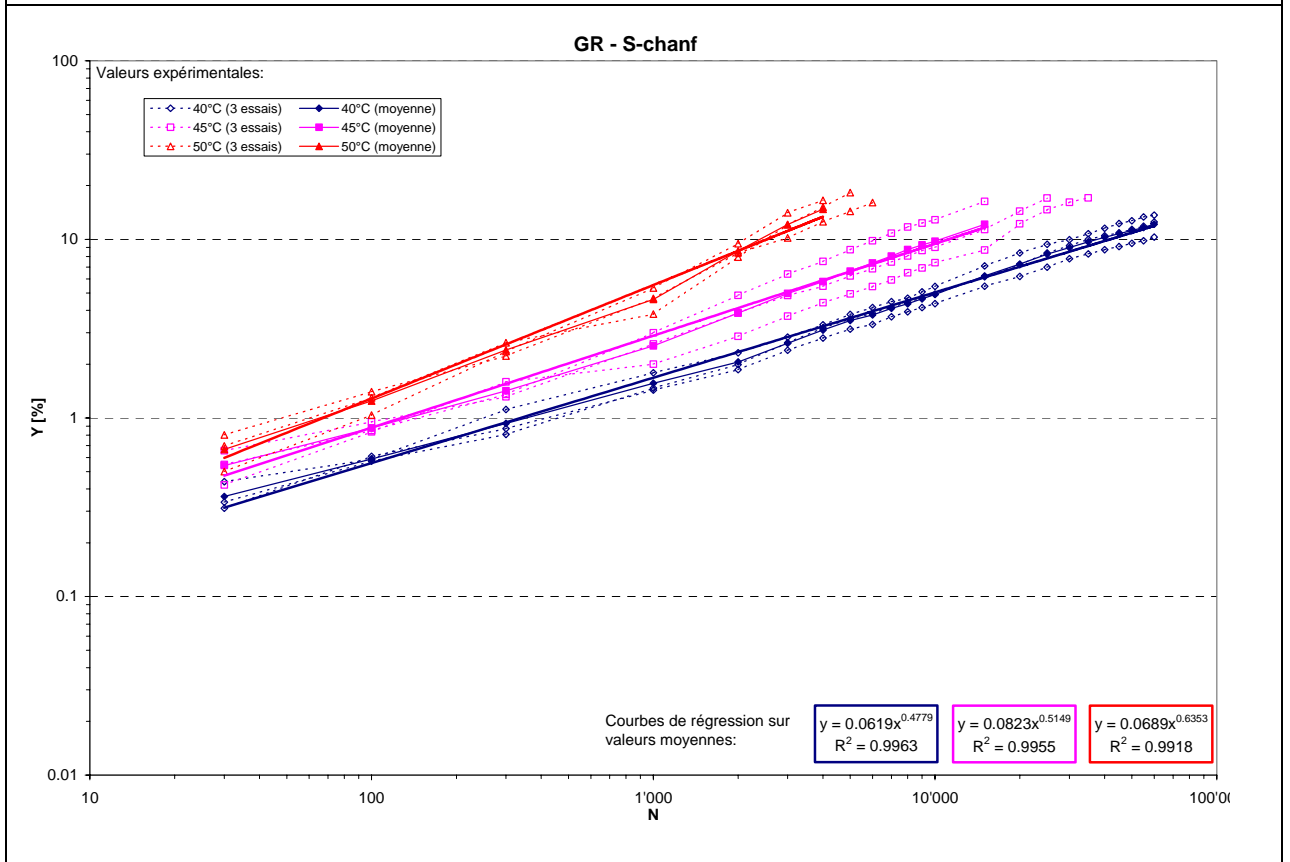
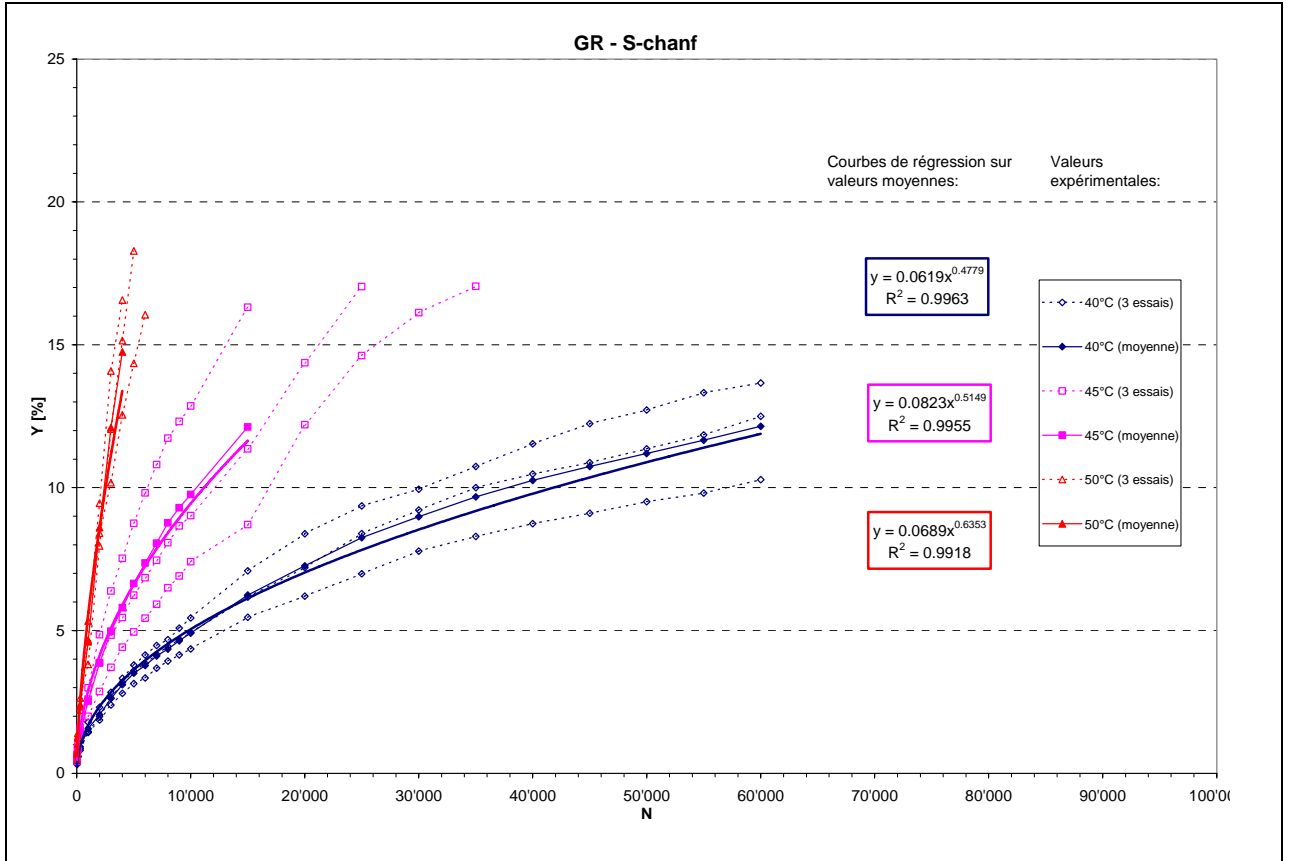
10.4.3 GR – Davos



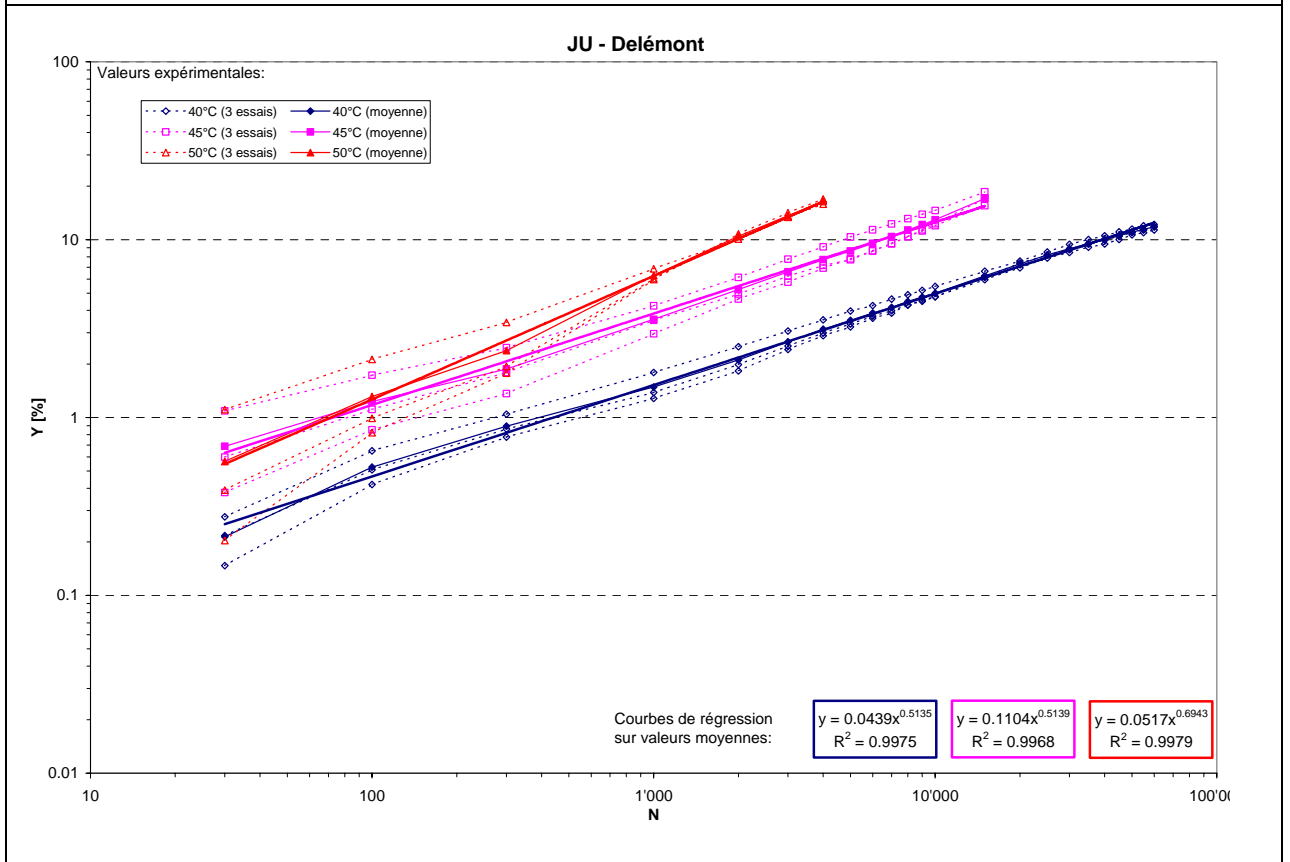
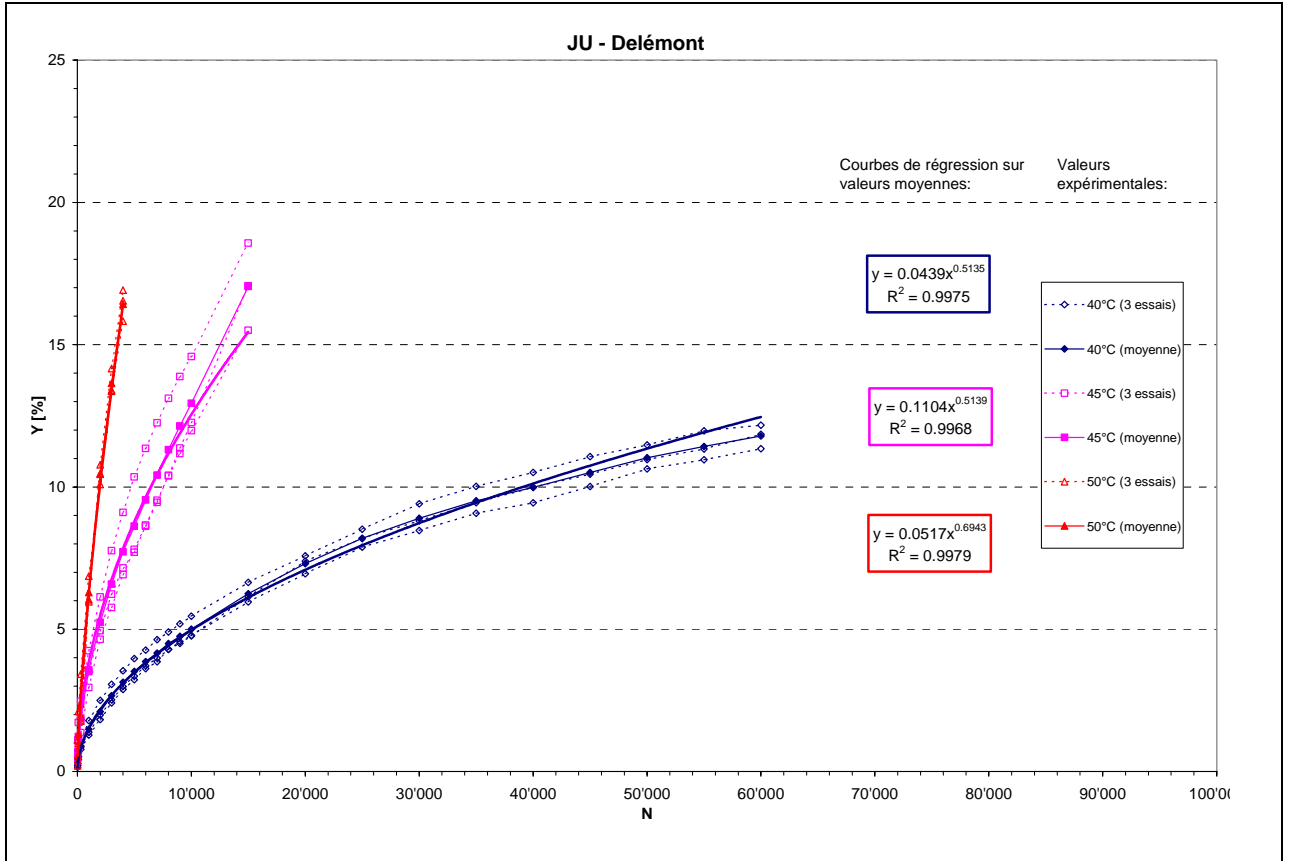
10.4.4 GR – Grüşch



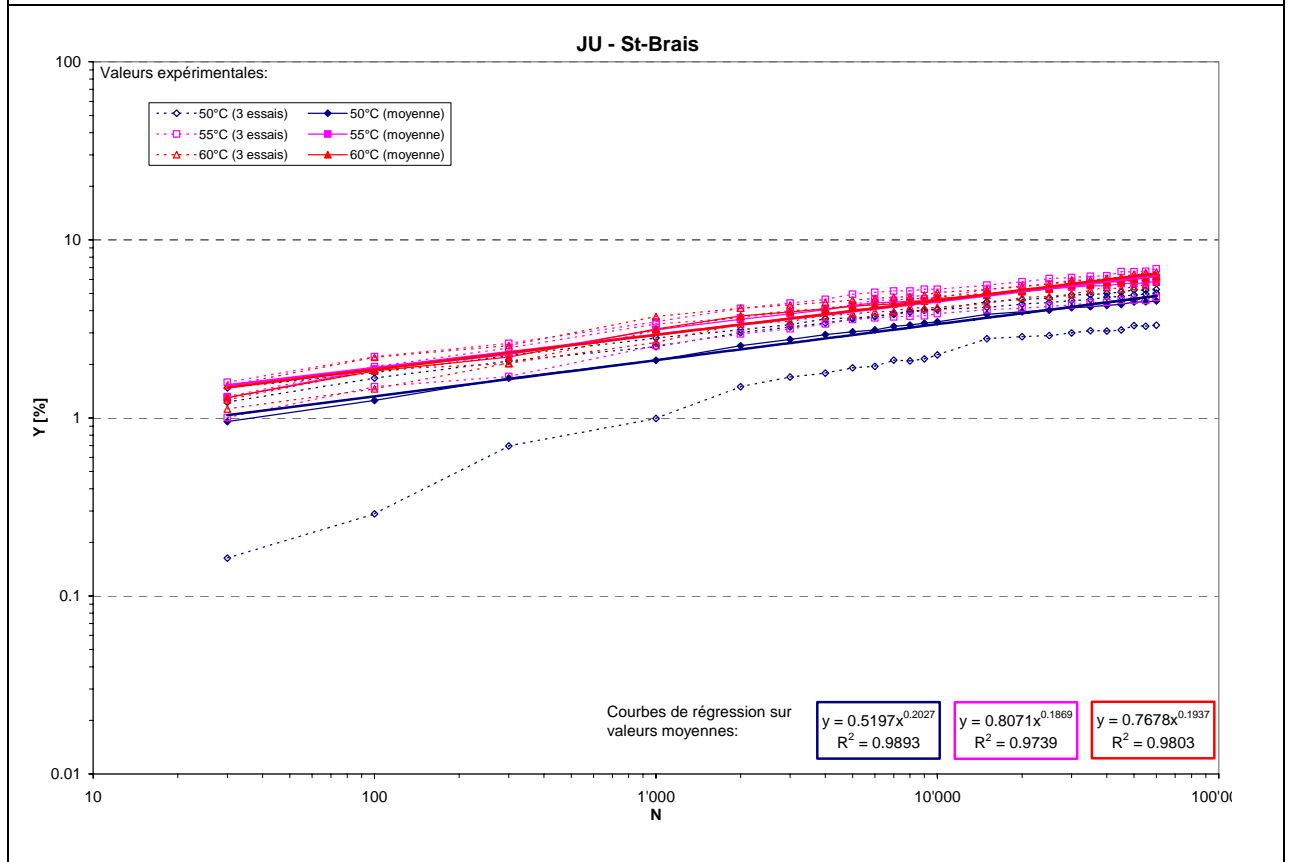
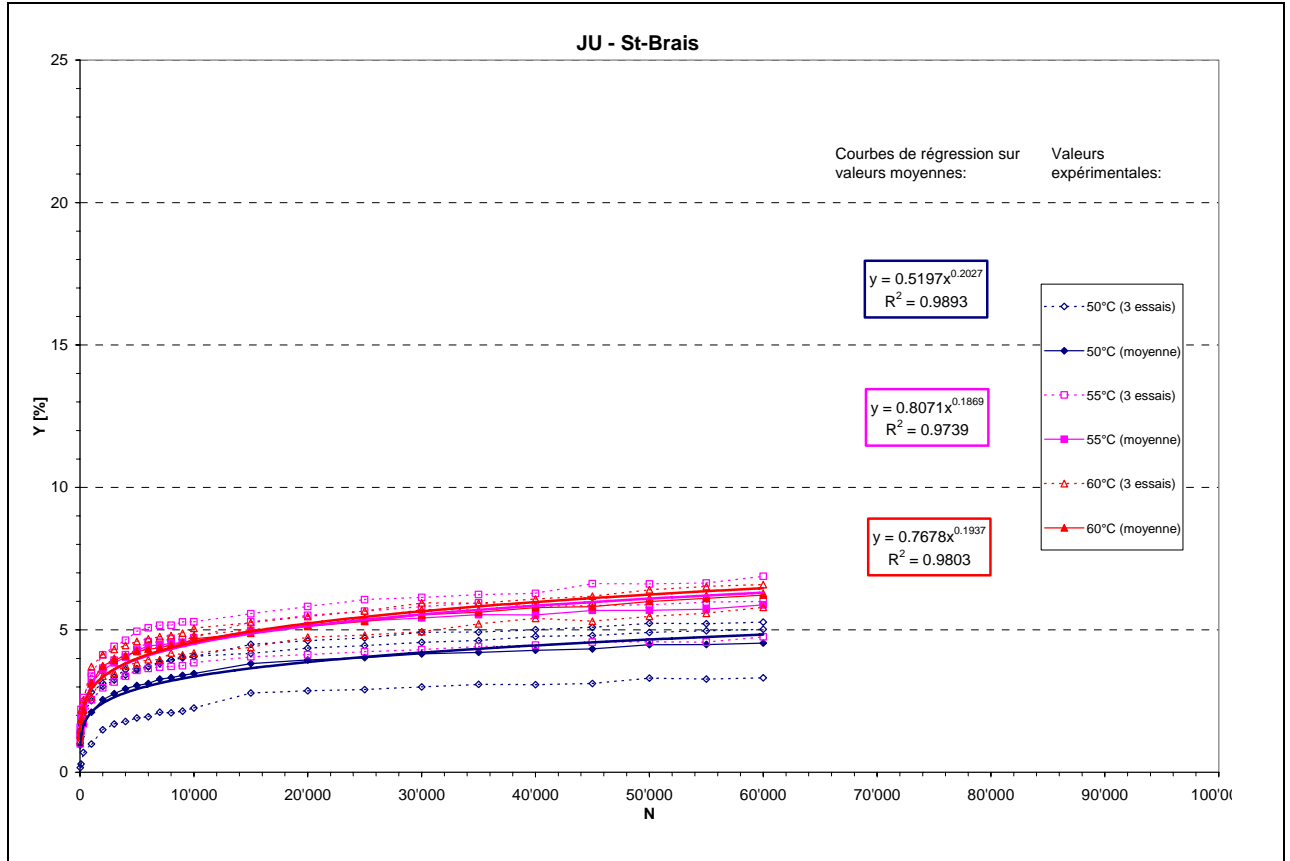
10.4.5 GR – S-chanf



10.4.6 JU – Delémont

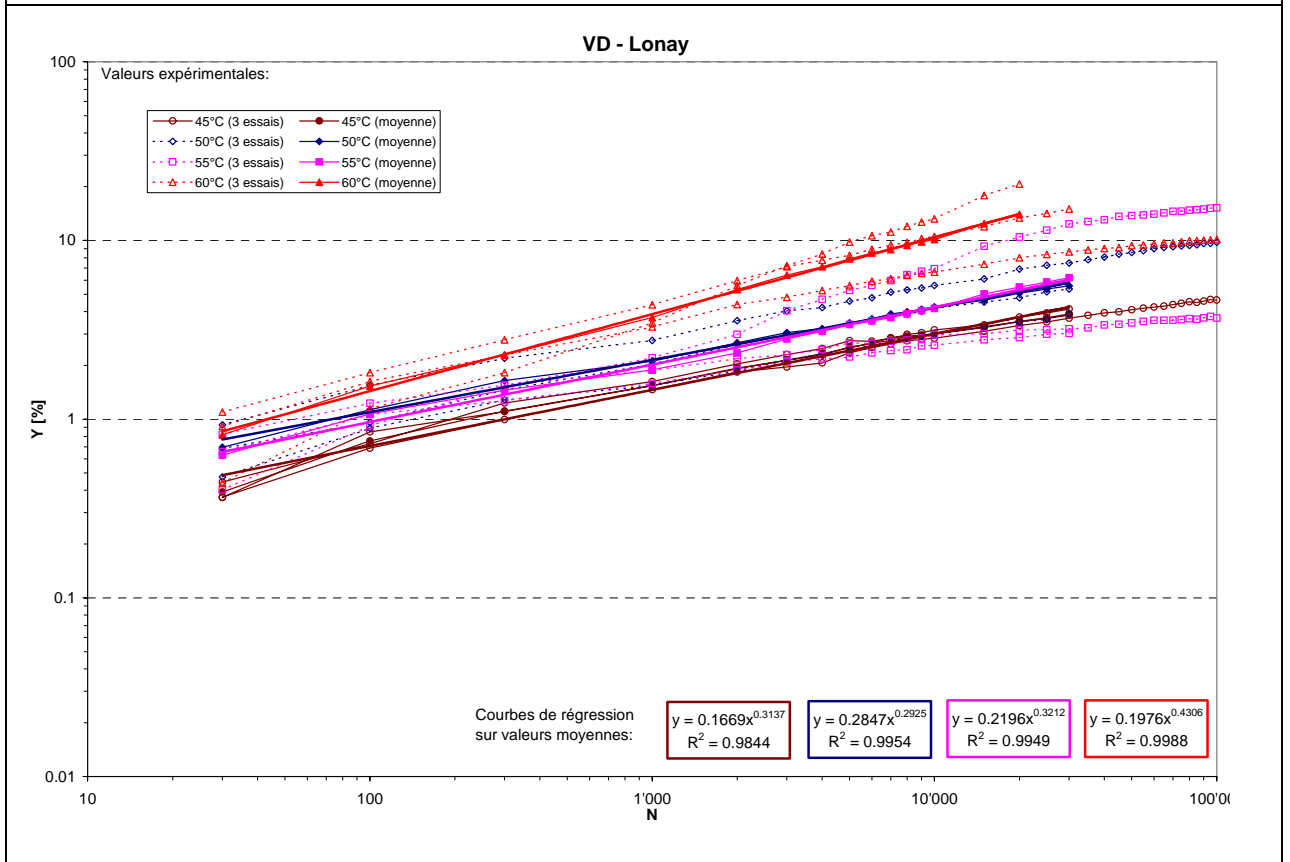
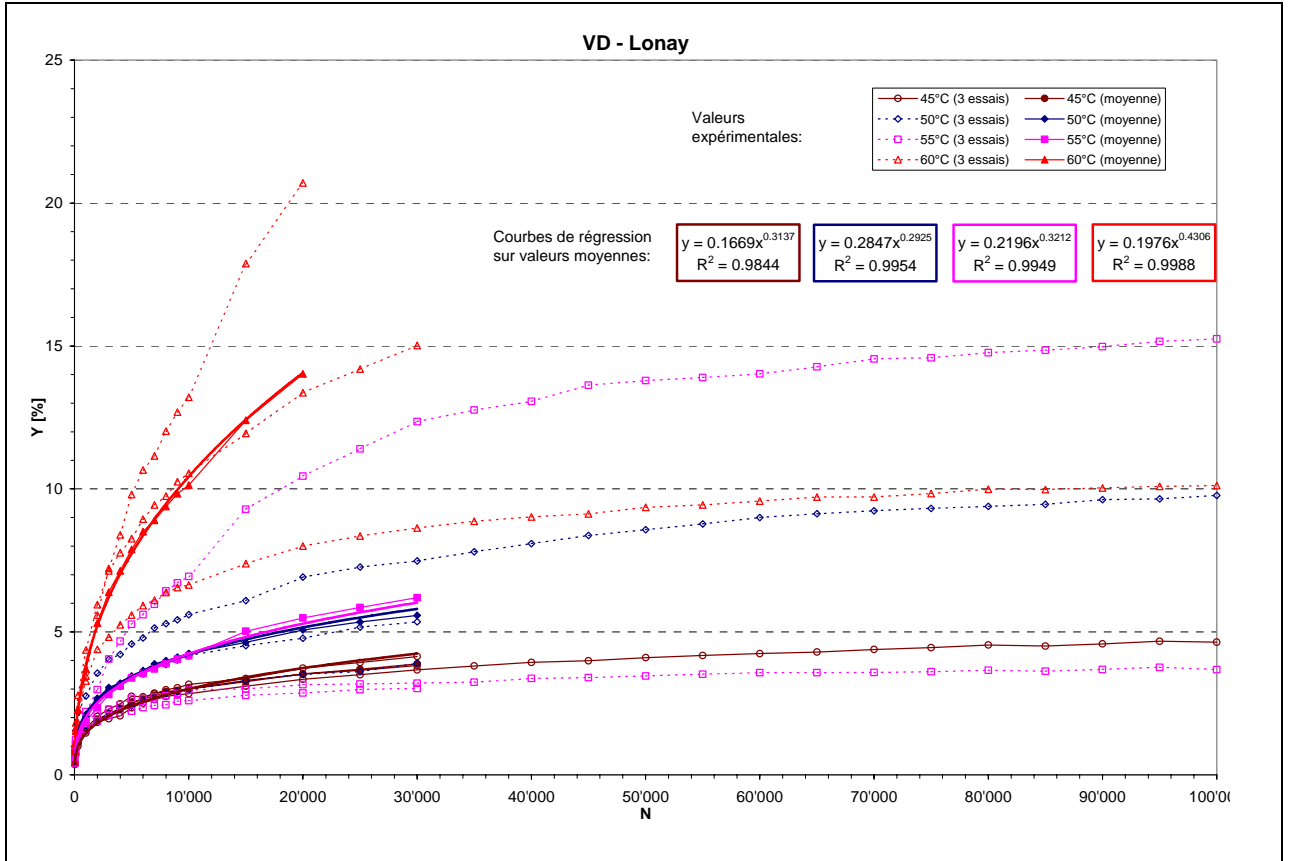


10.4.7 JU – St-Brais

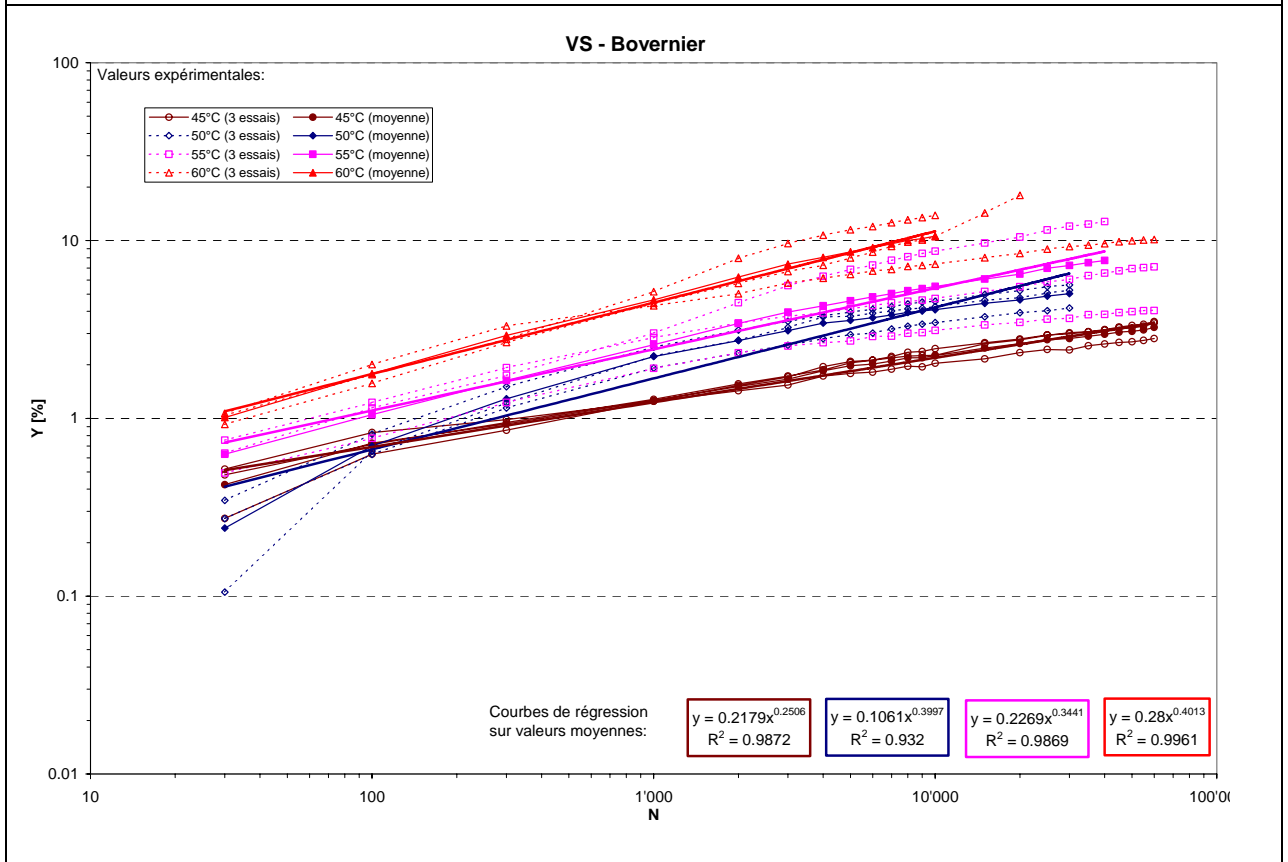
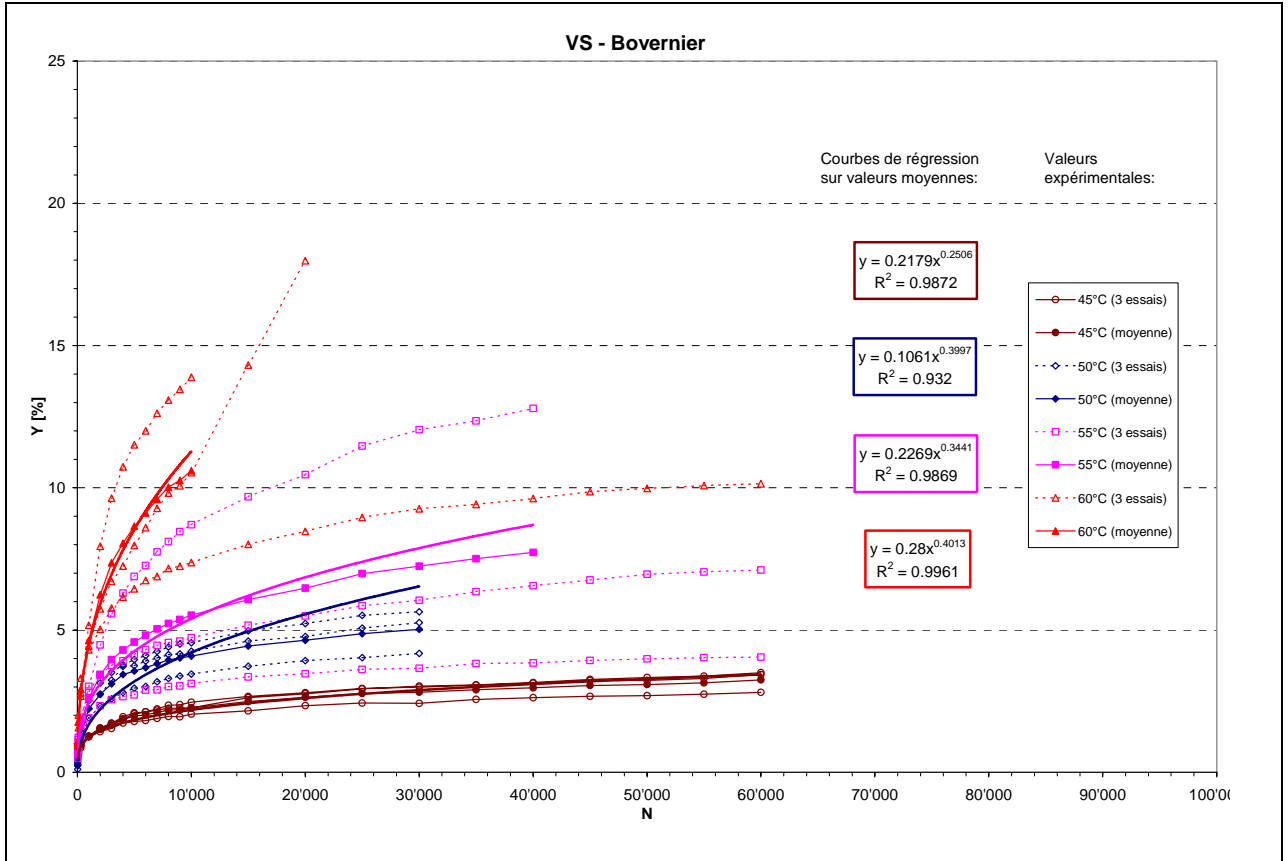




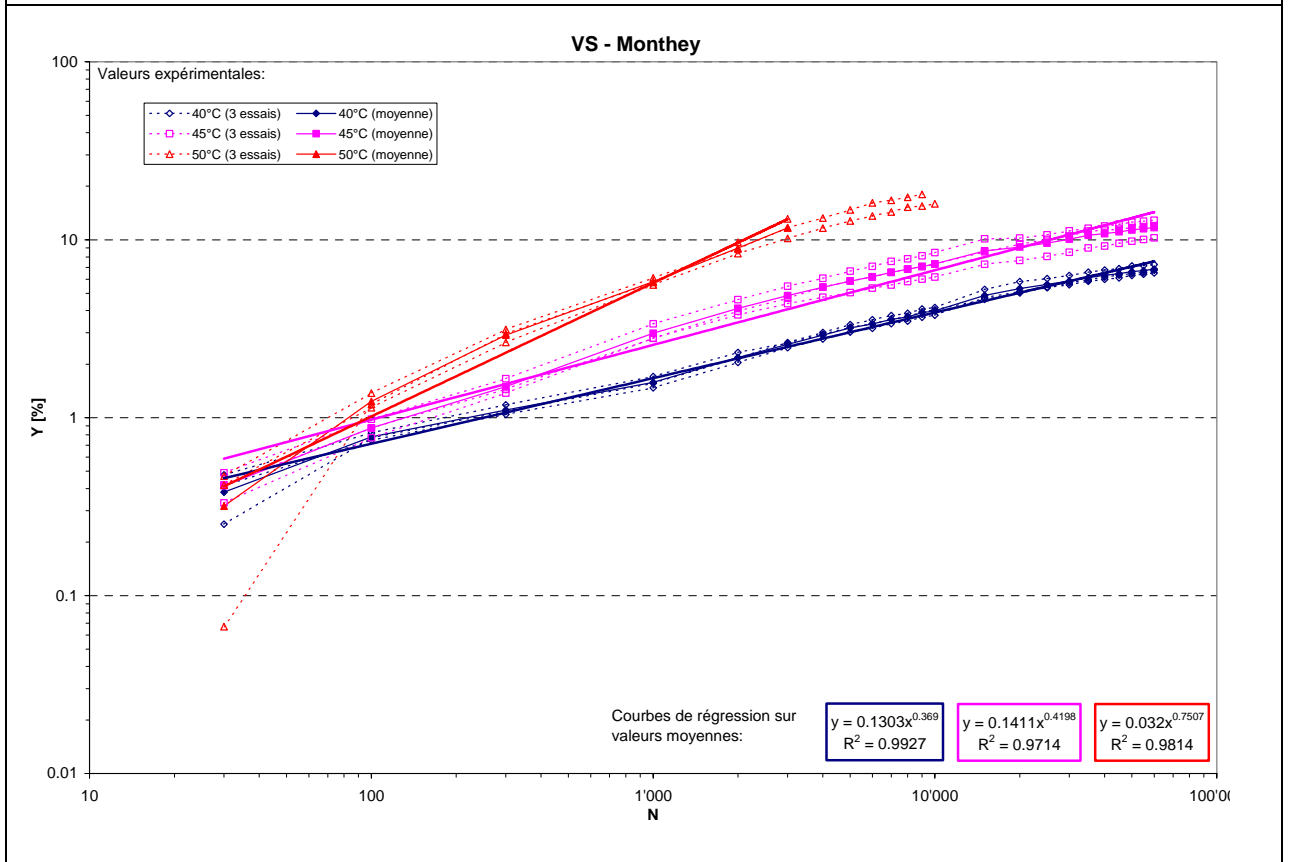
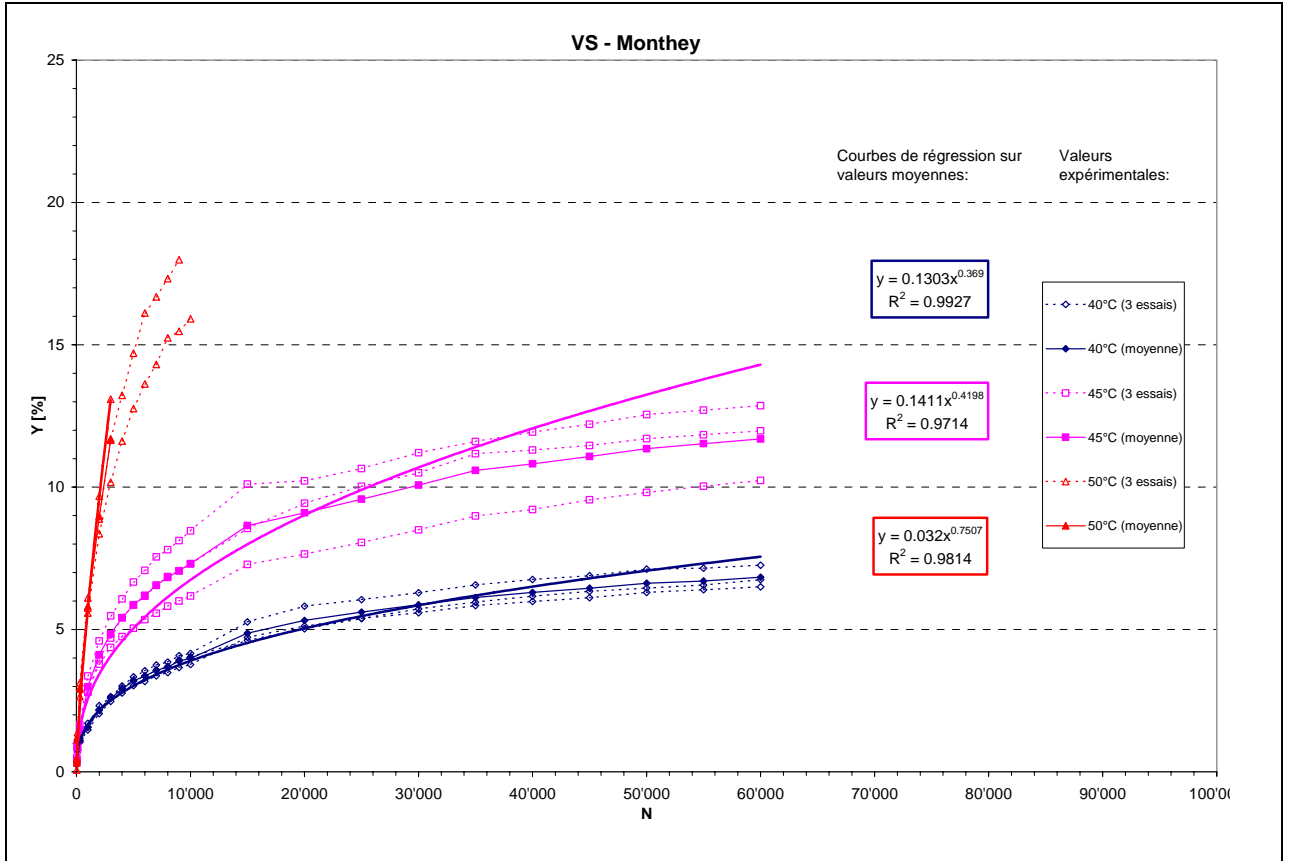
10.4.8 VD - Lonay



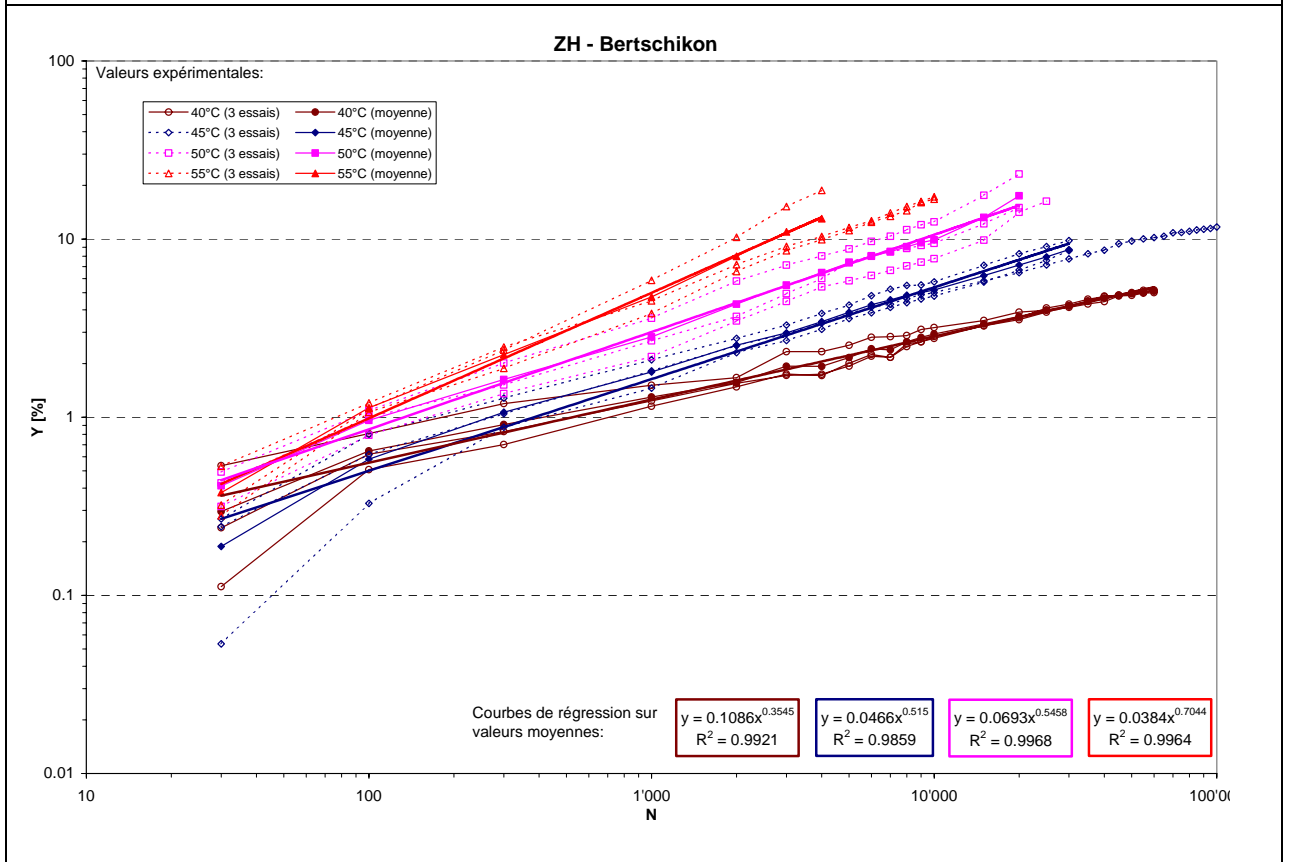
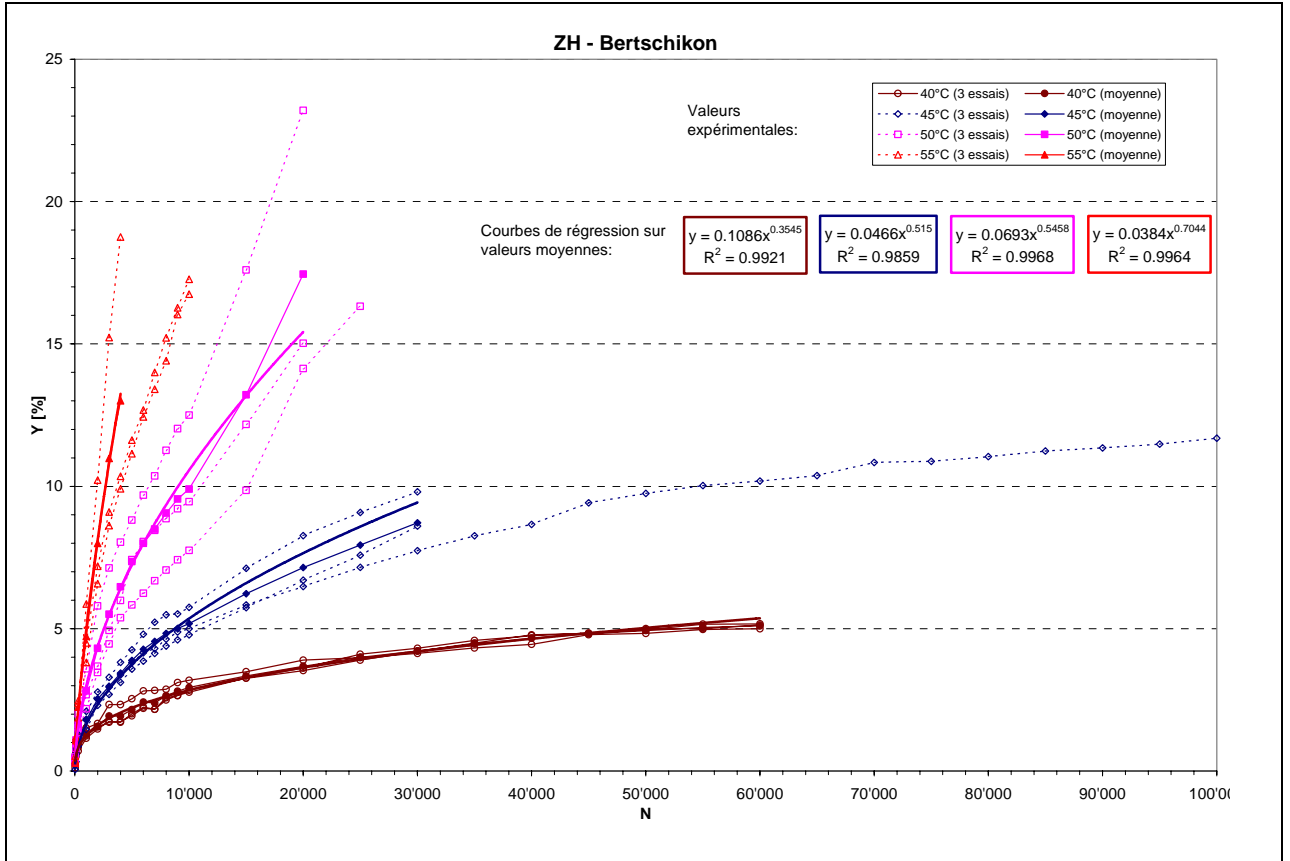
10.4.9 VS – Bovernier



10.4.10 VS – Monthey



10.4.11 ZH – Bertschikon



## 10.5 Calcul du trafic pondéral équivalent

### 10.5.1 FR – Kleingumfels

Pourcentage PL: 8.00%

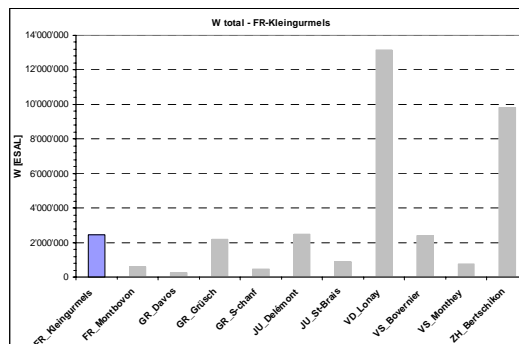
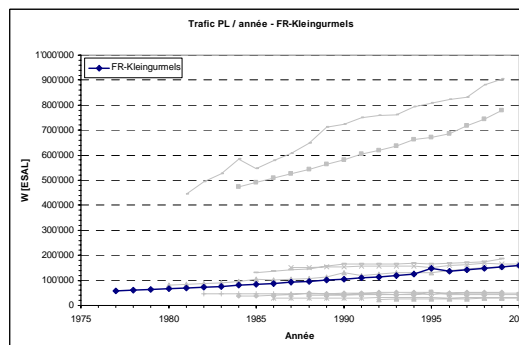
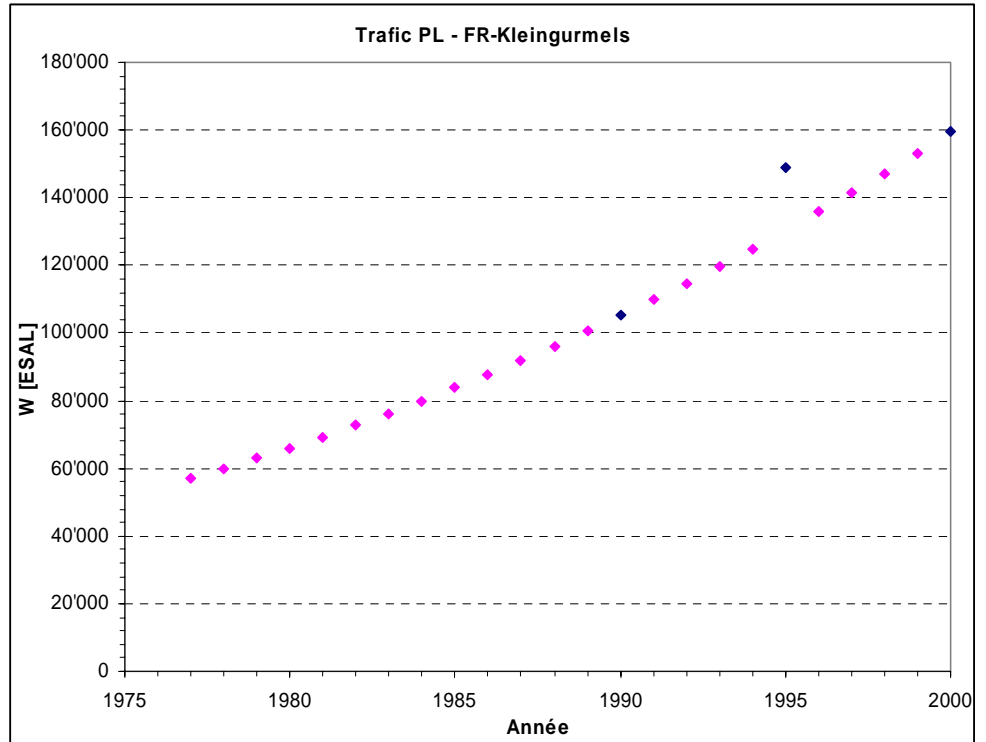
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 8.04%

Année	TJM	W
1977	3'252	56'970
1978	3'418	59'879
1979	3'591	62'909
1980	3'771	66'065
1981	3'958	69'348
1982	4'153	72'761
1983	4'356	76'309
1984	4'566	79'993
1985	4'784	83'817
1986	5'010	87'783
1987	5'245	91'893
1988	5'488	96'151
1989	5'740	100'558
1990	6'000	105'120
1991	6'269	109'831
1992	6'547	114'699
1993	6'834	119'726
1994	7'130	124'911
1995	8'500	148'920
1996	7'749	135'765
1997	8'073	141'435
1998	8'406	147'270
1999	8'748	153'268
2000	9'100	159'432

**Total 2'464'813**



### 10.5.2 FR – Montbovon

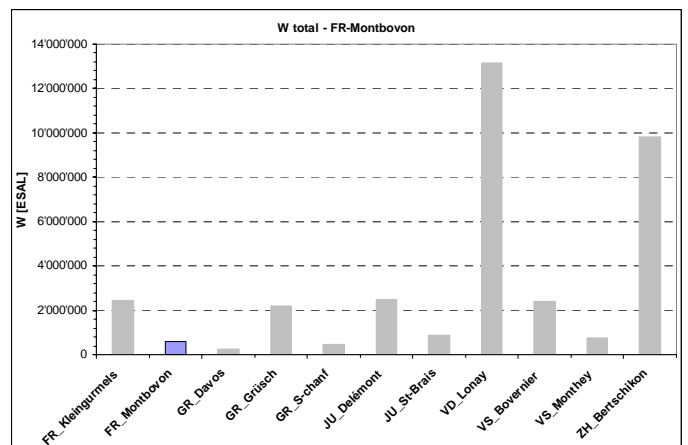
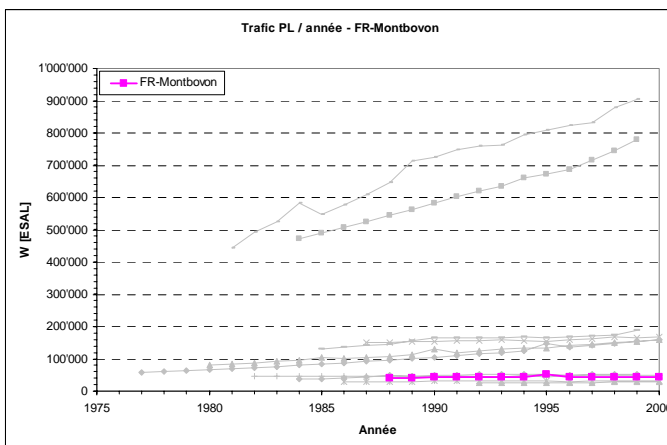
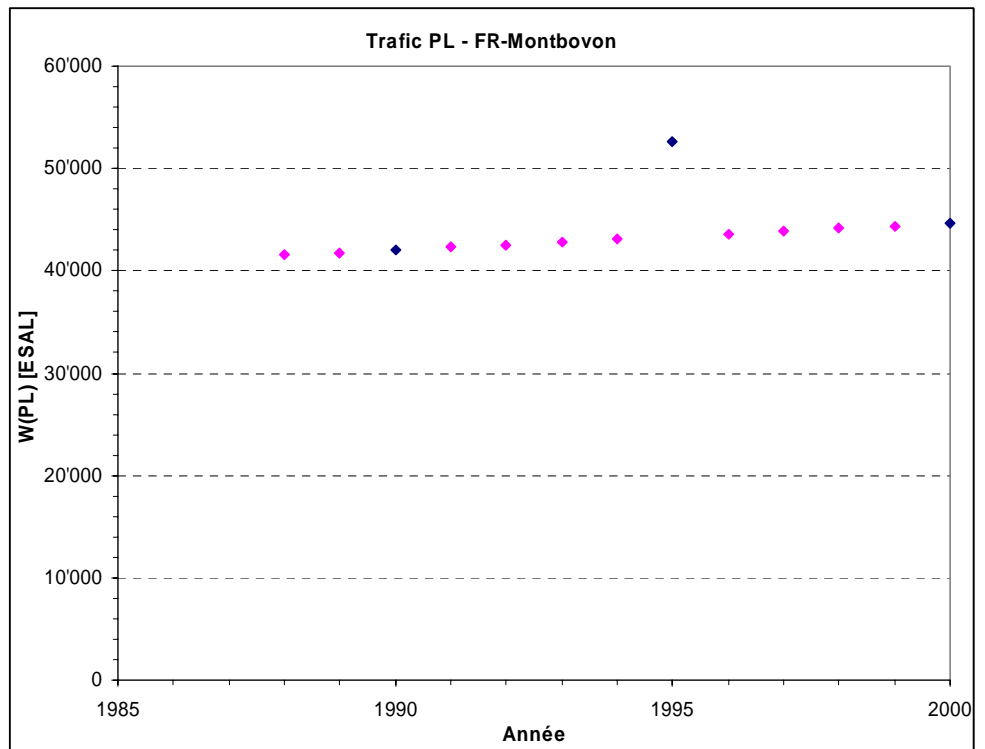
Pourcentage PL: 6.00%

Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 1.21%

Année	TJM	W
1988	3'161	41'534
1989	3'180	41'790
1990	3'200	42'048
1991	3'220	42'305
1992	3'239	42'564
1993	3'259	42'824
1994	3'279	43'085
1995	4'000	52'560
1996	3'319	43'611
1997	3'339	43'876
1998	3'359	44'142
1999	3'380	44'408
2000	3'400	44'676
<b>Total</b>		<b>569'422</b>



### 10.5.3 GR – Davos

Pourcentage PL: 3.98%

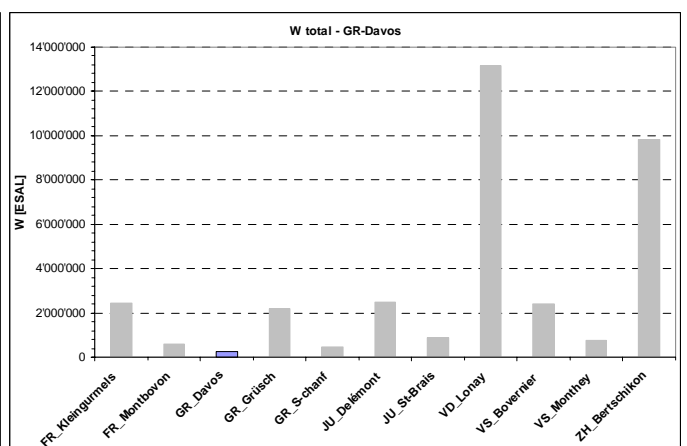
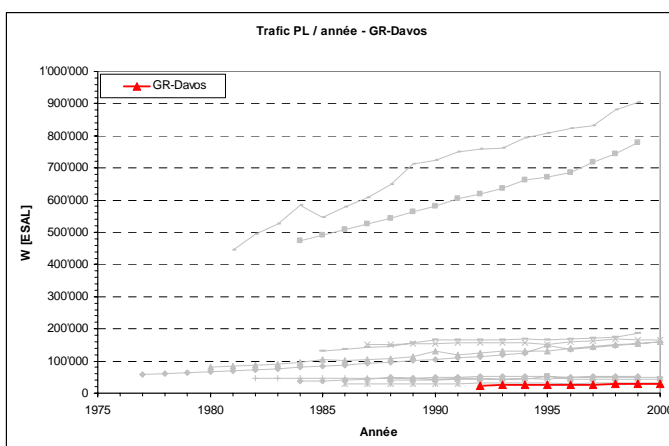
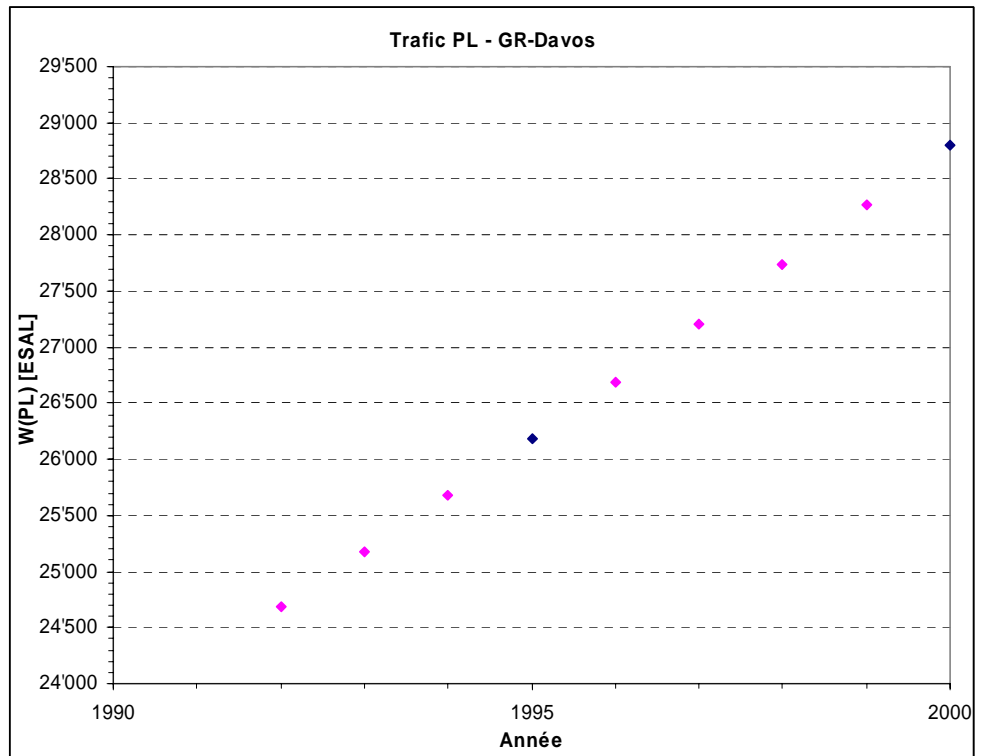
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 3.80%

Année	TJM	W
1992	2'830	24'693
1993	2'886	25'182
1994	2'942	25'679
1995	3'000	26'180
1996	3'059	26'691
1997	3'118	27'208
1998	3'178	27'731
1999	3'238	28'262
2000	3'300	28'799

**Total 240'425**



## 10.5.4 GR – Grüşch

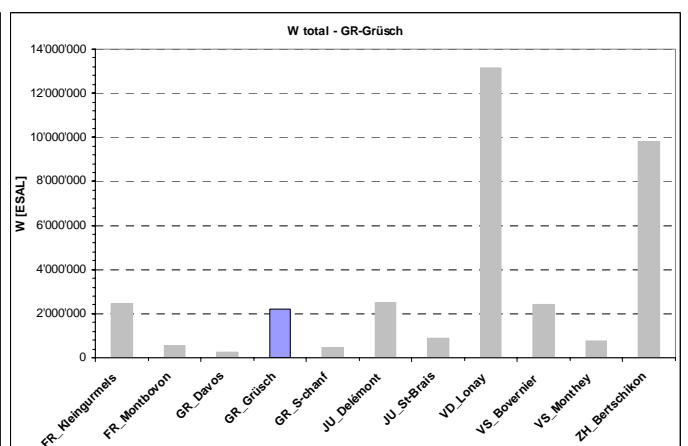
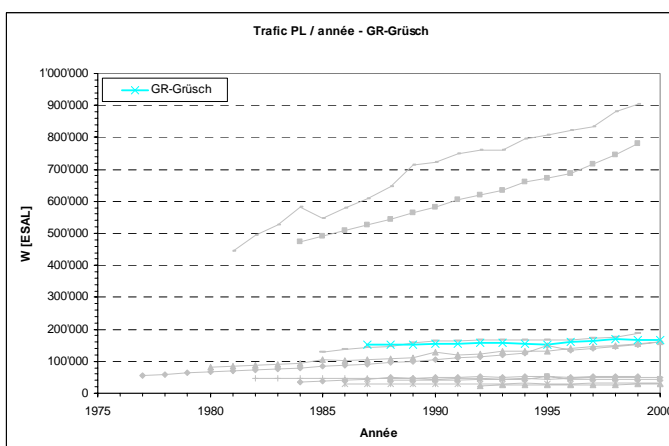
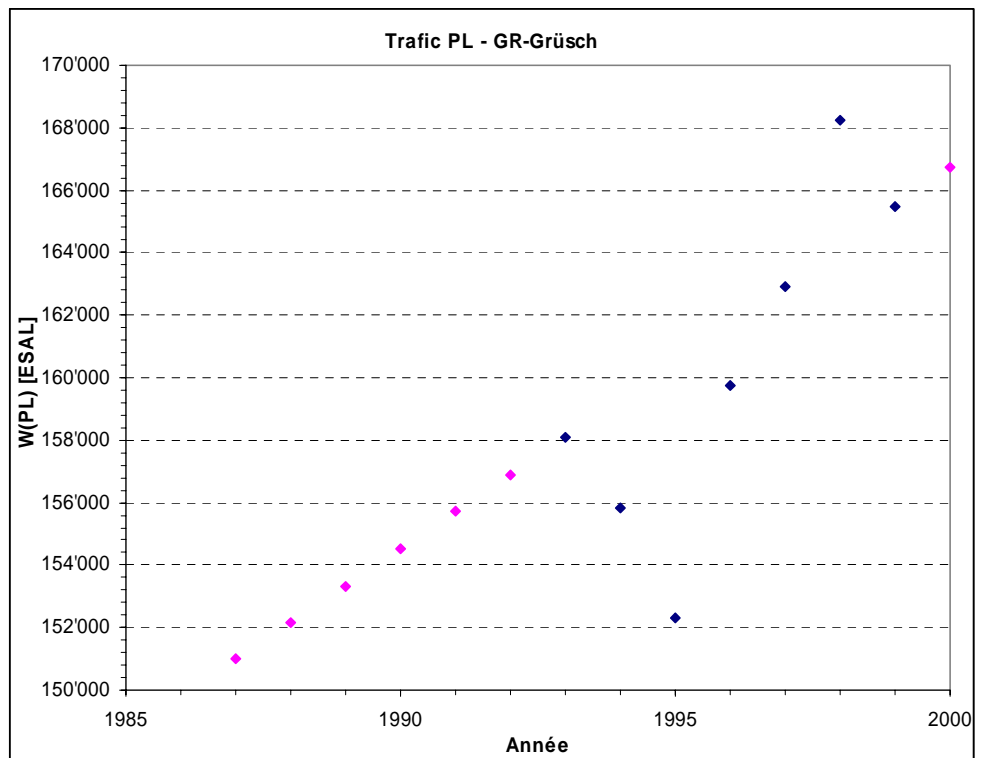
Pourcentage PL: 6.38%

Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 1.51%

Année	TJM	W
1987	10'815	150'989
1988	10'899	152'161
1989	10'983	153'338
1990	11'068	154'522
1991	11'153	155'712
1992	11'239	156'908
1993	11'325	158'115
1994	11'410	159'810
1995	10'908	152'296
1996	11'410	159'730
1997	11'669	162'908
1998	12'050	168'233
1999	11'851	165'456
2000	11'942	166'729
<b>Total</b>		<b>2'212'906</b>





## 10.5.5 GR – S-chanf

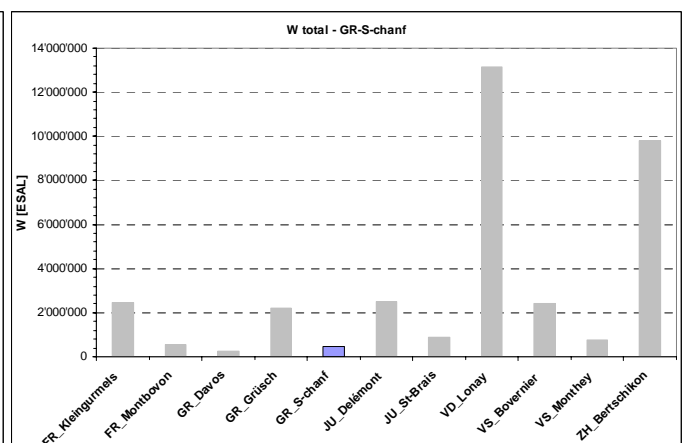
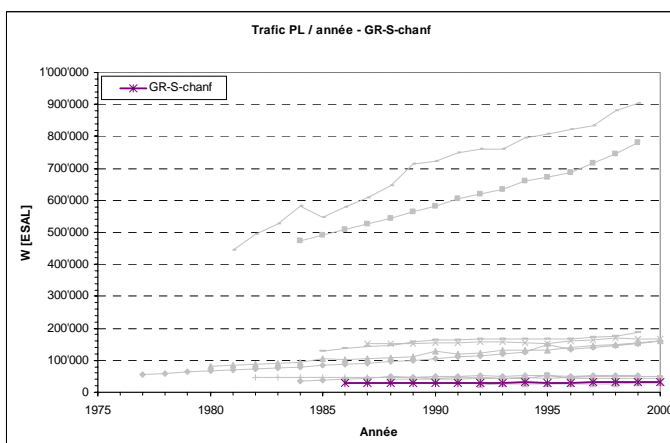
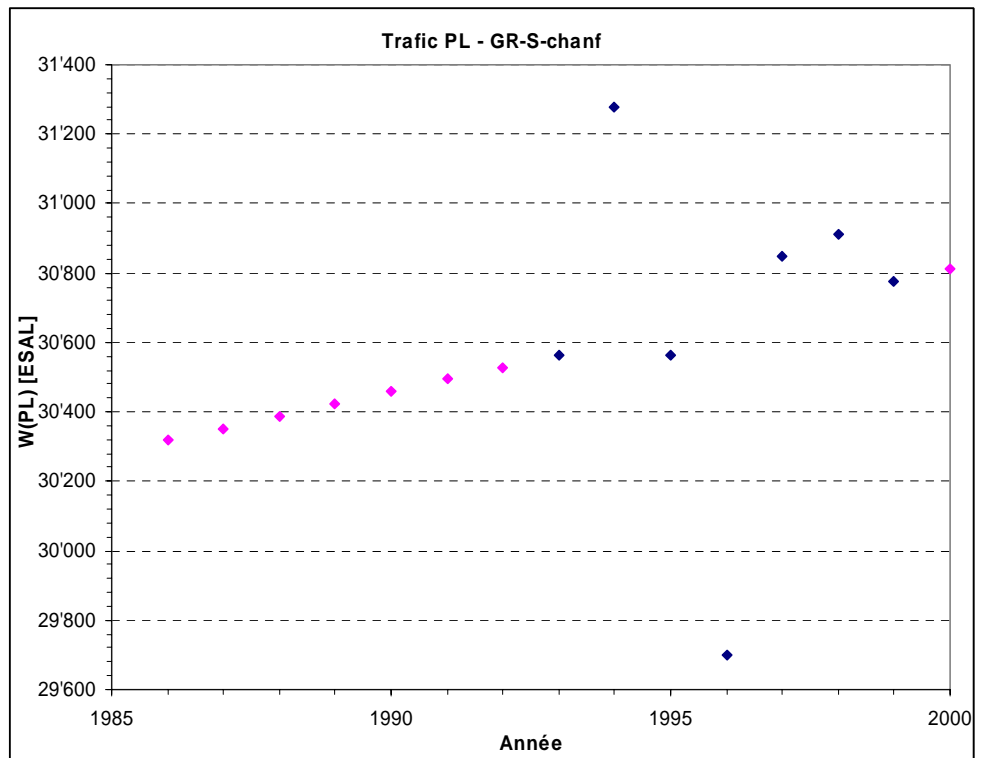
Pourcentage PL: 5.07%

Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 0.23%

Année	TJM	W
1986	2'728	30'317
1987	2'731	30'352
1988	2'734	30'388
1989	2'737	30'423
1990	2'741	30'458
1991	2'744	30'493
1992	2'747	30'529
1993	2'750	30'564
1994	2'814	31'276
1995	2'750	30'561
1996	2'665	29'698
1997	2'776	30'846
1998	2'781	30'909
1999	2'769	30'777
2000	2'772	30'812
<b>Total</b>	<b>458'403</b>	



## 10.5.6 JU – Delémont

Pourcentage PL: 3.24%

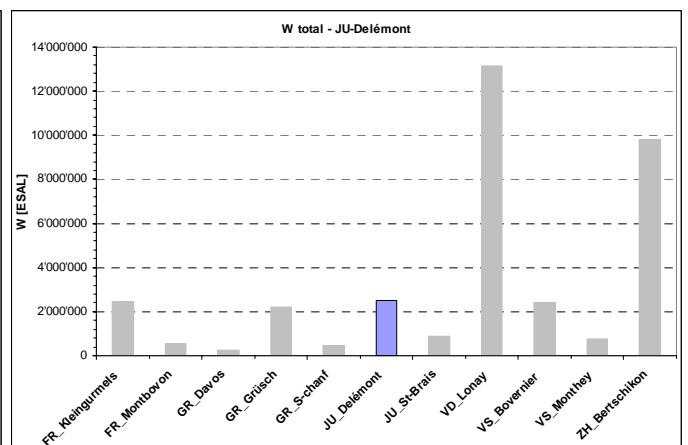
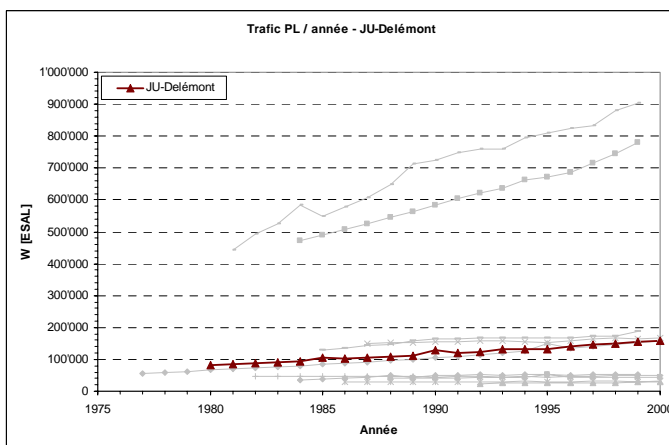
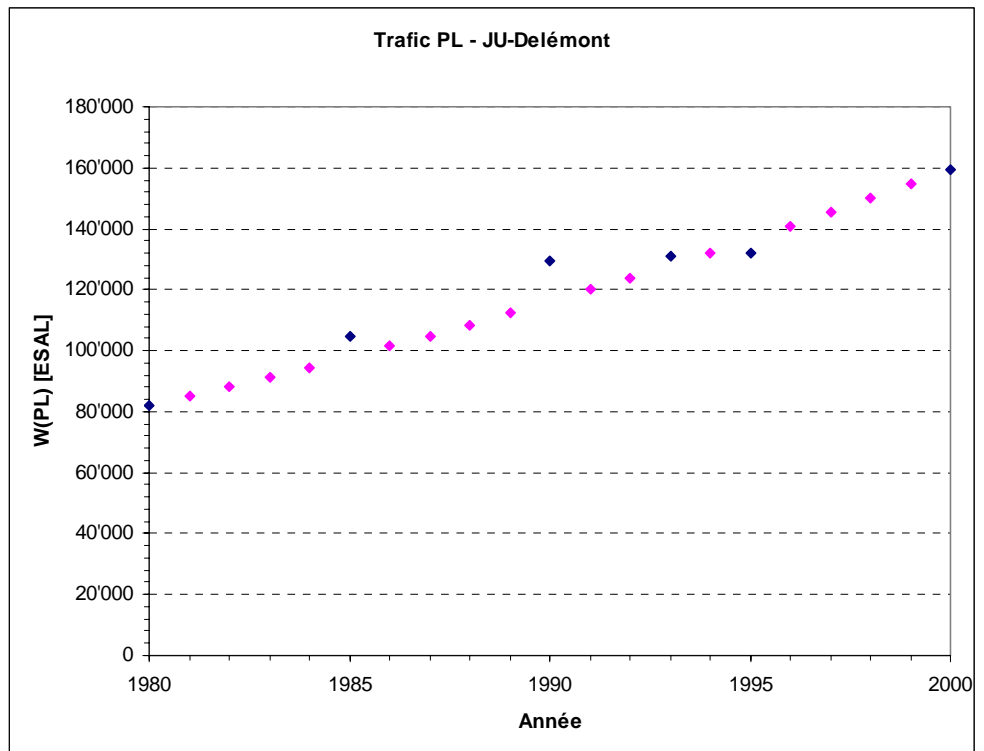
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 6.17%

Année	TJM	W
1980	11'582	82'064
1981	12'006	85'069
1982	12'442	88'157
1983	12'890	91'332
1984	13'350	94'594
1985	14'800	104'865
1986	14'309	101'385
1987	14'807	104'917
1988	15'319	108'540
1989	15'843	112'255
1990	18'300	129'665
1991	16'931	119'967
1992	17'496	123'964
1993	18'500	131'082
1994	18'664	132'247
1995	18'650	132'145
1996	19'888	140'916
1997	20'520	145'396
1998	21'166	149'974
1999	21'826	154'650
2000	22'500	159'424

**Total** 2'492'605



## 10.5.7 JU – St-Brais

Pourcentage PL: 7.05%

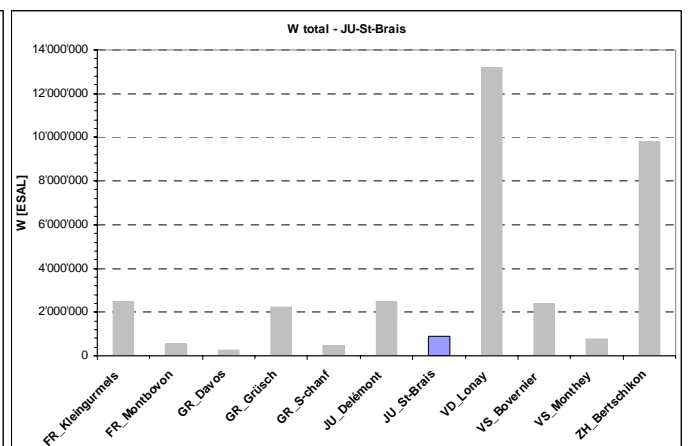
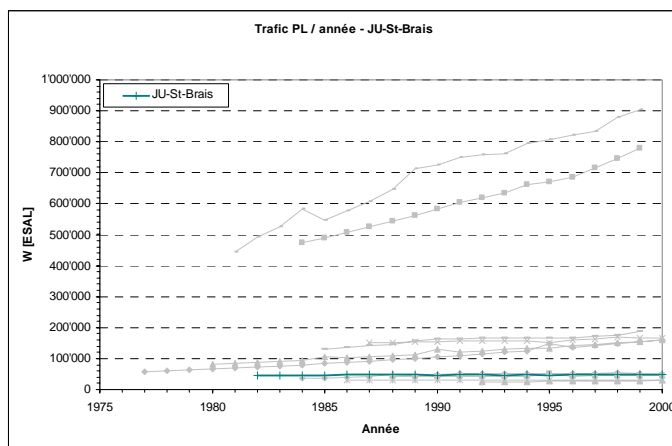
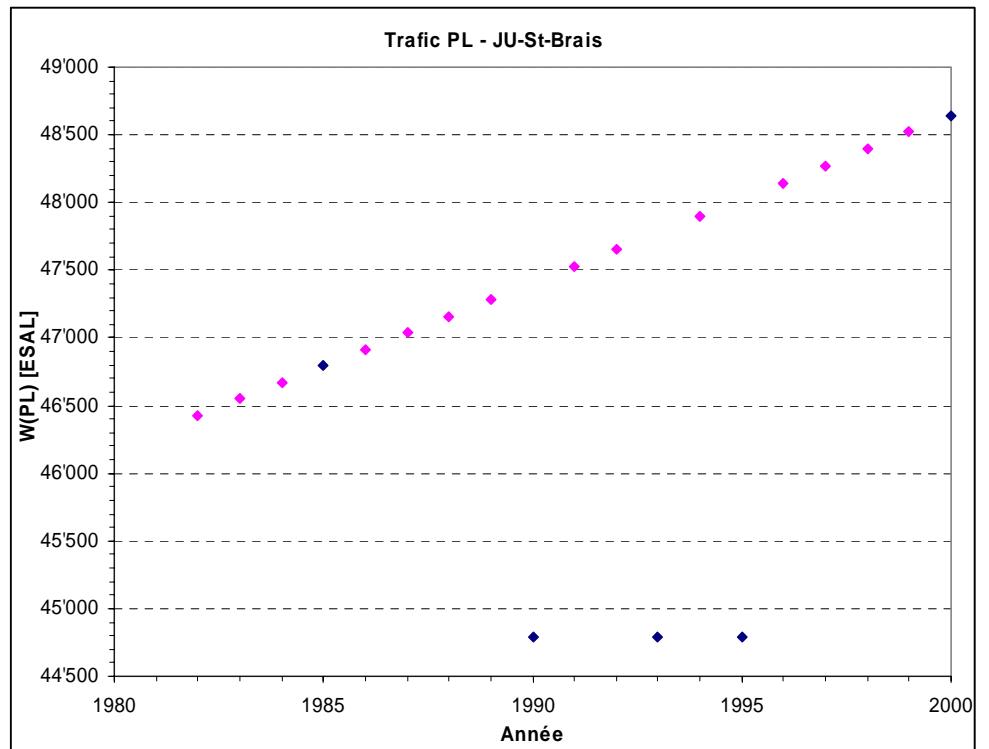
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 0.52%

Année	TJM	W
1982	3'006	46'430
1983	3'014	46'551
1984	3'022	46'672
1985	3'030	46'792
1986	3'038	46'916
1987	3'046	47'038
1988	3'054	47'161
1989	3'062	47'283
1990	2'900	44'785
1991	3'078	47'529
1992	3'086	47'652
1993	2'900	44'785
1994	3'102	47'899
1995	2'900	44'785
1996	3'118	48'147
1997	3'126	48'271
1998	3'134	48'396
1999	3'142	48'521
2000	3'150	48'646

**Total 894'259**



## 10.5.8 VD – Lonay

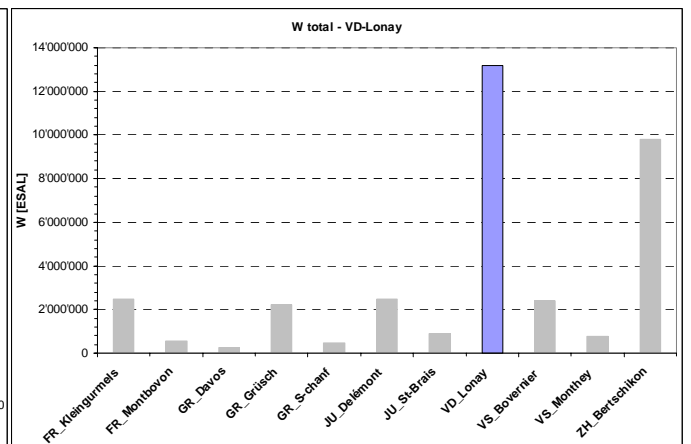
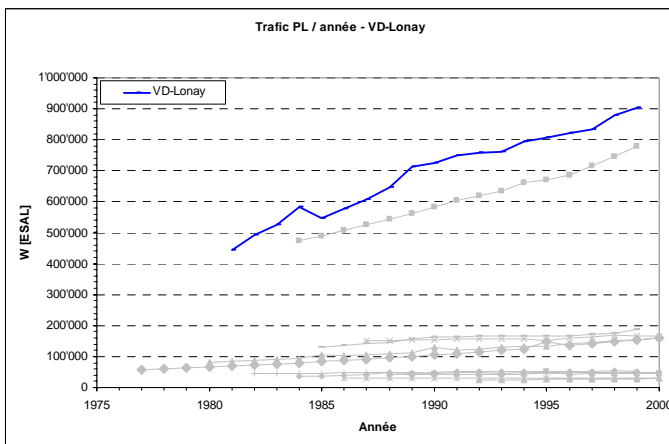
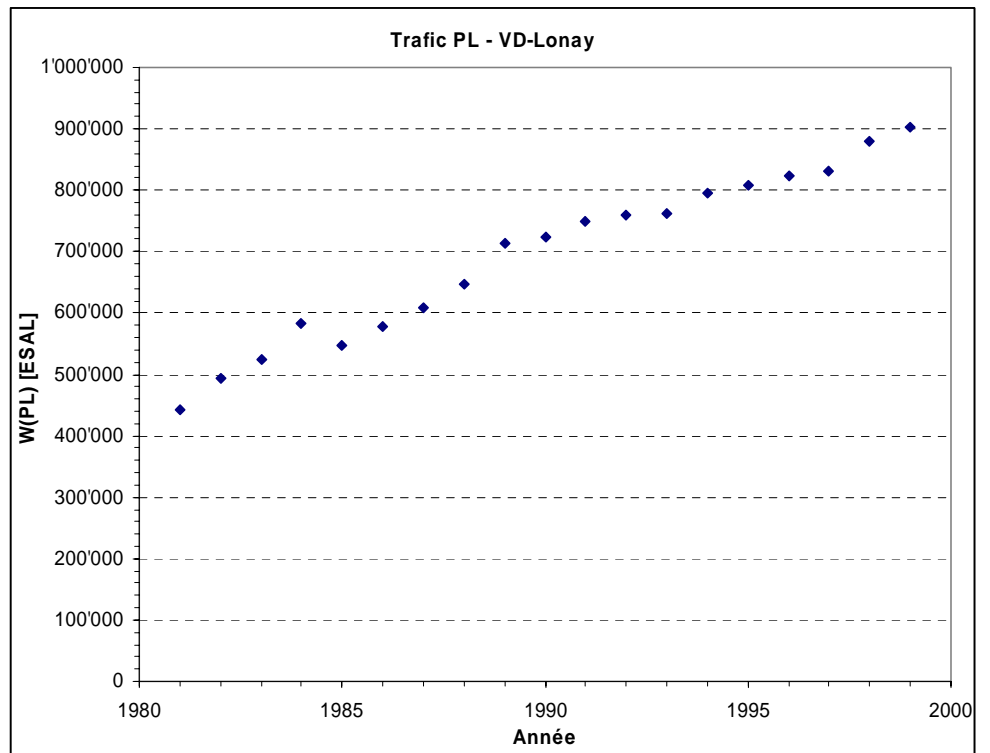
Pourcentage PL: 6.03%

Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 45%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.30

Année	TJM	W
1981	34'450	443'563
1982	38'300	493'134
1983	40'800	525'323
1984	45'300	583'263
1985	42'500	547'211
1986	44'900	578'113
1987	47'250	608'370
1988	50'250	646'997
1989	55'400	713'306
1990	56'200	723'606
1991	58'150	748'714
1992	58'950	759'014
1993	59'100	760'945
1994	61'700	794'422
1995	62'750	807'941
1996	63'900	822'748
1997	64'650	832'405
1998	68'300	879'401
1999	70'200	903'864

**Total** 13'172'339



### 10.5.9 VS – Bovernier

Pourcentage PL: 6.00%

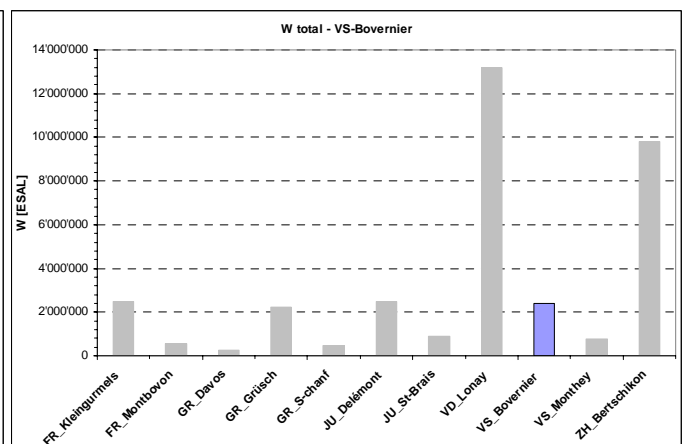
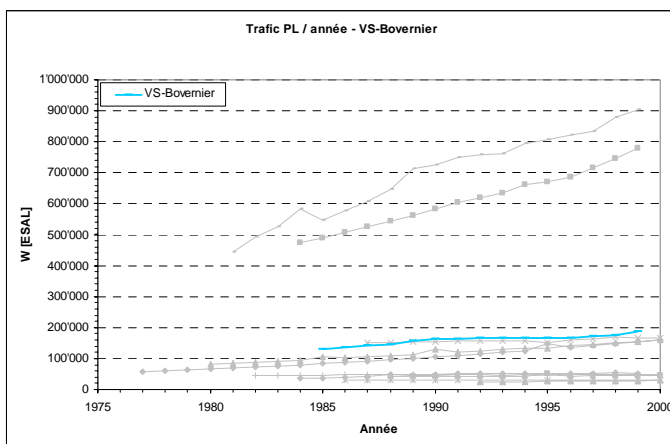
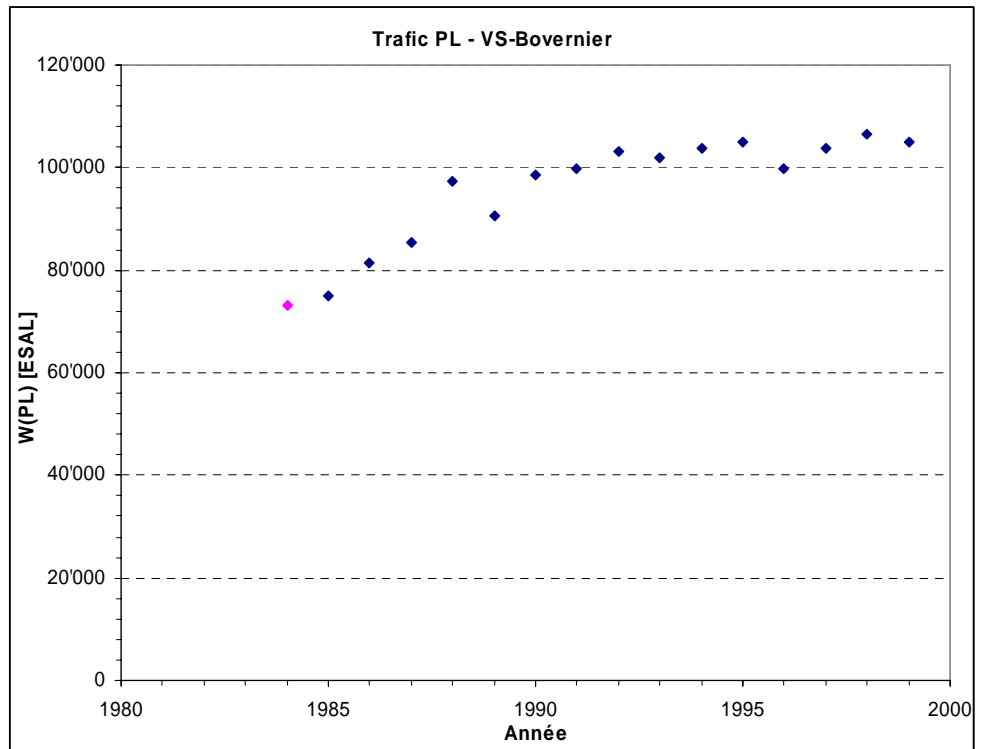
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 4.67%

Année	TJM	W
1984	5'557	73'015
1985	5'700	74'898
1986	6'200	81'468
1987	6'500	85'410
1988	7'400	97'236
1989	6'900	90'666
1990	7'500	98'550
1991	7'600	99'864
1992	7'850	103'149
1993	7'750	101'835
1994	7'900	103'806
1995	8'000	105'120
1996	7'600	99'864
1997	7'900	103'806
1998	8'100	106'434
1999	8'000	105'120

Total 1'530'241



## 10.5.10 VS – Monthey

Pourcentage PL: 3.00%

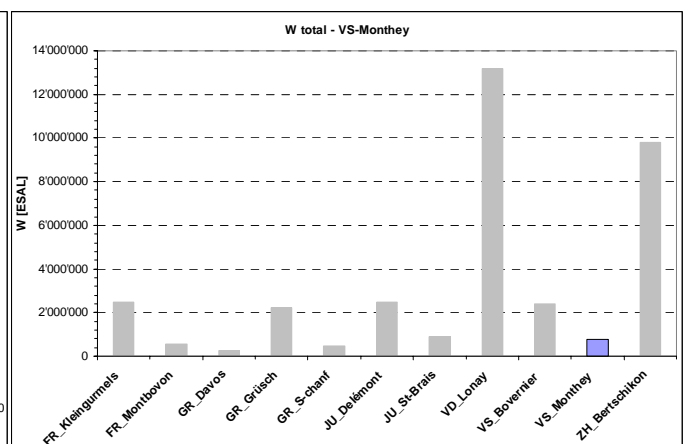
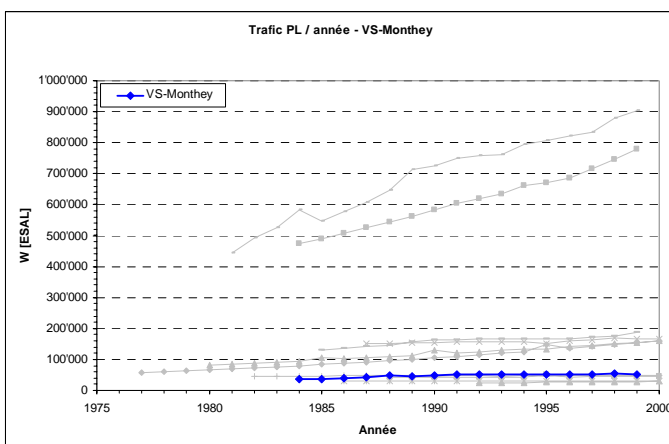
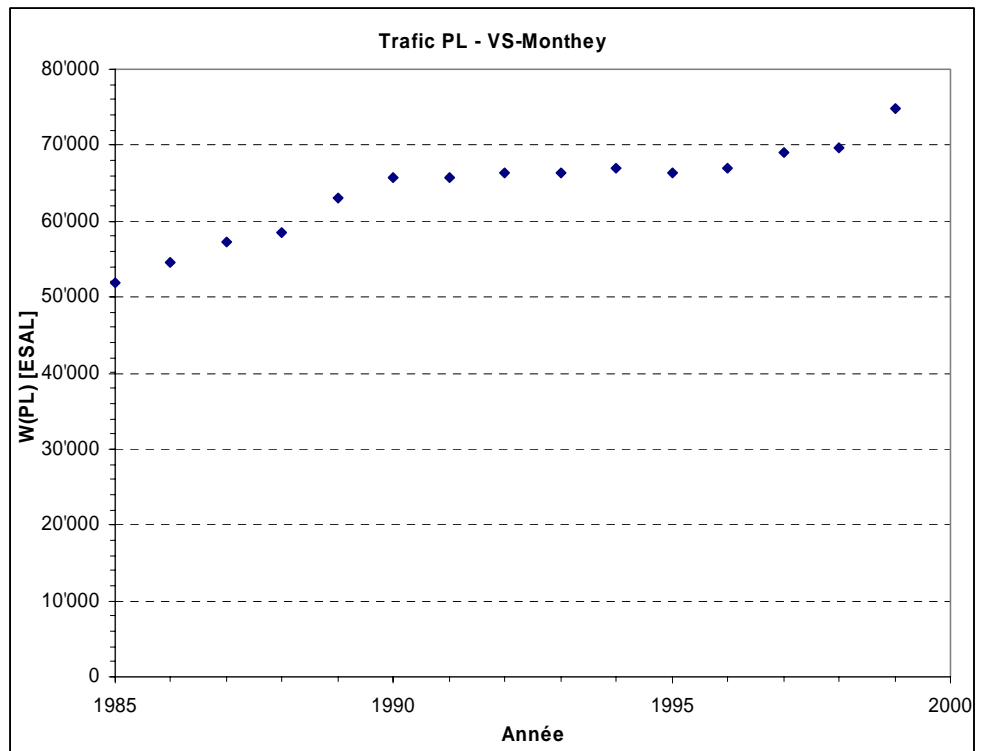
Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 50%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.20

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 5.04%

Année	TJM	W
1985	7'900	51'903
1986	8'300	54'531
1987	8'700	57'159
1988	8'900	58'473
1989	9'600	63'072
1990	10'000	65'700
1991	10'000	65'700
1992	10'100	66'357
1993	10'100	66'357
1994	10'200	67'014
1995	10'100	66'357
1996	10'200	67'014
1997	10'500	68'985
1998	10'600	69'642
1999	11'400	74'898

Total 963'162



## 10.5.11 ZH – Bertschikon

Pourcentage PL: 10.39%

Répartition du trafic en fonction du nombre de voies: 45%

Facteur d'équivalence moyen k: 1.30

Taux d'accroissement annuel (constant) r: 6.34%

Année	TJM	W
1984	21'314	472'864
1985	22'085	489'968
1986	22'877	507'537
1987	23'690	525'577
1988	24'525	544'092
1989	25'381	563'087
1990	26'259	582'562
1991	27'225	603'993
1992	27'969	620'499
1993	28'642	635'430
1994	29'846	662'141
1995	30'277	671'703
1996	30'952	686'678
1997	32'316	716'938
1998	33'596	745'336
1999	35'166	780'166

Total

9'808'574

