

Projet National de recherche et développement

**RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE**

**RELEVÉS AUTOMATISÉS**  
**Contribution à l'élaboration d'un indicateur  
structurel**

**Auteur(s) / Organisme(s) :**

Romain DEGRANGE – DIAGWAY

Hervé GUIRAUD - CEREMA

Bruno JOLY - TECHNOLOGIES NOUVELLES

Emmanuel LOISON – COLAS

Julie MAIGNOL - NEXTROAD

Damien PILET – GINGER CEBTP

Sébastien WASNER – CEREMA

**Thème de rattachement :**

Thème 2

Tranche 3 – Relevés automatiques - Contribution à l'élaboration d'un  
indicateur structurel

DVDC/R/047

LC/19/DVDC/108/109/110/111/112/113/114/116/118

Juillet 2024

Site internet : [www.dvdc.fr](http://www.dvdc.fr)

Plateforme collaborative : [www.omnispace.fr/dvdc](http://www.omnispace.fr/dvdc)

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IREX ([www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr)), 9 rue de Berri 75008 PARIS, [contact@irex.asso.fr](mailto:contact@irex.asso.fr)

## Sommaire

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Sommaire</b> .....                                 | <b>2</b>  |
| <b>1 Objectif</b> .....                               | <b>3</b>  |
| <b>2 Déroulement de l'étude</b> .....                 | <b>3</b>  |
| <b>3 Indicateur Structurel ISa</b> .....              | <b>5</b>  |
| 3.1 Principe .....                                    | 6         |
| 3.2 Données « entrantes » .....                       | 6         |
| 3.2.1 Fissuration .....                               | 6         |
| 3.2.2 Déformations .....                              | 8         |
| 3.3 Calcul indicateur ISa : méthodologie .....        | 11        |
| 3.3.1 Principe .....                                  | 11        |
| 3.3.2 Etapes du calcul .....                          | 12        |
| 3.3.3 Notation ISa .....                              | 16        |
| <b>4 Conclusion</b> .....                             | <b>18</b> |
| <b>5 Annexes</b> .....                                | <b>19</b> |
| 5.1 Indicateur Structurel standard IS .....           | 19        |
| 5.1.1 Principe .....                                  | 19        |
| 5.1.2 Entrants .....                                  | 21        |
| 5.1.3 Table de décision .....                         | 22        |
| 5.1.4 Logigramme .....                                | 23        |
| 5.1.5 Simulateur .....                                | 24        |
| 5.2 Démarche CEREMA – Aigle3D – Réseau National ..... | 25        |

## 1 Objectif

---

L'objectif de l'étude est de proposer une méthode de calcul d'un indicateur structurel s'appuyant sur les données recueillies à l'aide de systèmes d'acquisition de type « LCMS ».

## 2 Déroulement de l'étude

---

Le groupe de travail a exploré deux axes lors des séances de recherche :

- 1<sup>er</sup> axe : proposition d'un indicateur structurel exclusivement élaboré à partir de données d'auscultation collectées à l'aide de technologie type LCMS ou équivalent. Ce premier axe permet de répondre précisément à la lettre de commande « DVDC »

L'indicateur proposé, dénommé ISa – pour Indicateur Structurel automatisé - s'appuie sur les notions de surfaces de chaussée impactées par les dégradations, disponibles lors d'acquisition avec les technologies type LCMS. Il s'inscrit dans la ligne des réflexions menées au sein des travaux DVDC en exploitant notamment la notion de grille élémentaire, notion précédemment utilisée pour la proposition de nouveaux descripteurs associables aux données LCMS. L'apport majeur pour cet indicateur est de pouvoir observer la présence, simultanée ou non, de multiples dégradations au même endroit. La localisation dans la voie lors de l'exploitation des données est également un paramètre qui est exploité (présence en bande de roulement ou en rive).

Cette partie est traitée dans le chapitre 3.

- 2<sup>nd</sup> axe : proposition complémentaire d'un indicateur structurel ne s'appuyant pas exclusivement sur des données LCMS ou équivalente, pour fournir un indicateur utilisable sur la base de relevés plus classiques type M2 ou M3 s'appuyant sur les méthodes d'essai M38-2 et M52.

L'indicateur proposé ici s'appuie sur les longueurs de chaussées affectées par les dégradations, typiquement par pas de 50 m ou de 100 m. Le mode opératoire mis en œuvre correspond à un enrichissement de ce qui est à ce jour couramment mis en œuvre par les gestionnaires de réseaux routiers, et intègre la prise en compte de données complémentaire type déflexion si le gestionnaire dispose de celles-ci. L'indicateur proposé est « à tiroir » et permet de fournir une information sur la qualité structurelle de la chaussée en fonction du niveau d'information disponible. Il s'appuie sur les éléments suivants :

- Les dégradations en surface de chaussée (données minimales pour que l'indicateur soit calculable) ;
- Enrichi avec, en fonction de la disponibilité des données :
  - Les déformations de type uni longitudinal et/ou transversal
  - La portance de la chaussée (déflexion, rayon de courbure de la déformée)

Cette partie, qui ne fait pas, stricto sensu l'objet de la commande, est présentée comme complément de l'étude en annexe 5.1.

Nous présentons également en annexe 5.2 la démarche mise en place par le CEREMA pour l'exploitation des données recueillies par Aigle3D dans le cadre du projet de suivi des Routes Nationales et le calcul de l'indicateur structurel associé. Les indicateurs et descripteurs exploités sont explicités dans le document associé au présent rapport « 2023\_10\_01\_CEREMA\_A3D\_pour\_DVDC.PDF ». L'indicateur structurel exploité par le CEREMA est également présenté.



**Remarque importante :**

Le présent document propose une démarche pour le calcul de l'indicateur structurel. Cette démarche n'a pas fait l'objet d'une validation « structurée » pour tester sa robustesse. Une étude complémentaire permettra de réaliser ce travail, avec notamment le calage des différents seuils proposés pour la mise en œuvre de la méthode.

### 3 Indicateur Structurel ISa

Nous proposons dans les chapitres qui suivent l'élaboration d'un indicateur structurel « ISa » (« a » pour rappeler le caractère automatisé des relevés de base) exploitant les capacités des nouvelles générations de systèmes d'acquisition de dégradations et déformations notamment en matière de localisation des informations recueillies. Ces systèmes fournissent des « images 3D » représentatives de la surface de chaussée auscultée qui sont exploitées pour réaliser la détection automatique de dégradations et la mesures de déformations.

Une image « 3D » est une image de la chaussée vue de dessus, et comportant une composante verticale de profondeur associée à chaque pixel, permettant par exemple de détecter la fissuration.

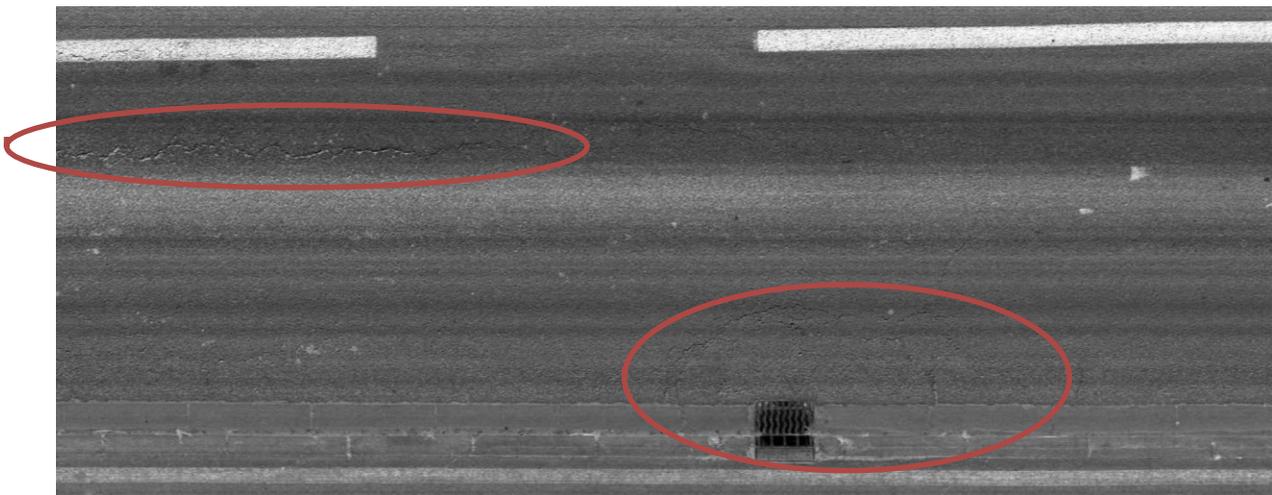
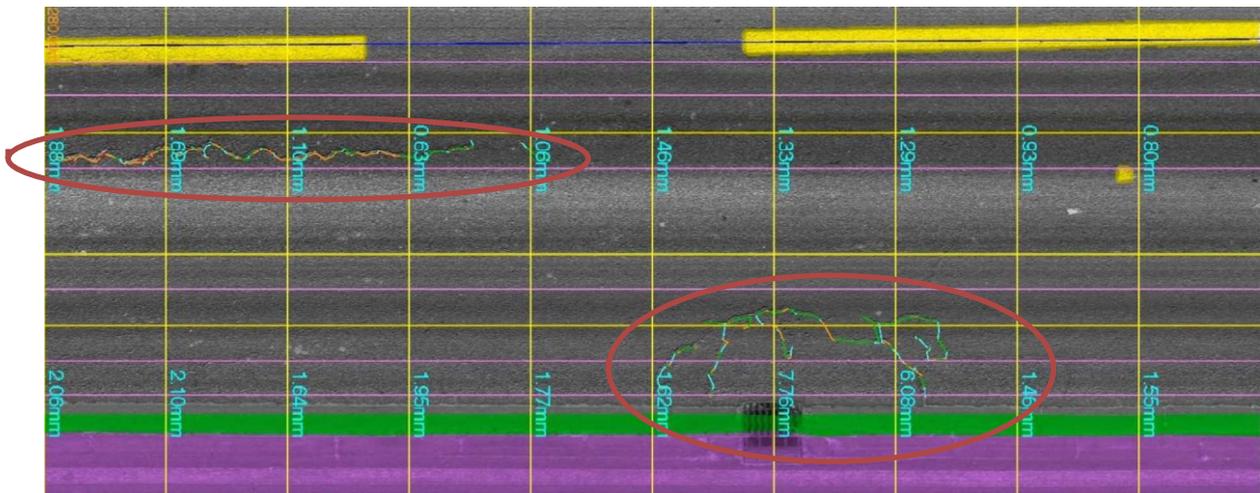


Image 3D fournie par le système d'acquisition



Exploitation de l'image pour la détection des dégradations

Dans l'image du bas on peut voir :

- De la fissuration dans les cercles rouges ;
- En bleu, les valeurs de déformations transversales (en mm) dans les bandes de roulement côté axe (ornière gauche) et côté rive (ornière droite), au pas de 1 m (les pas de mesure sont matérialisés par les traits verticaux jaunes).

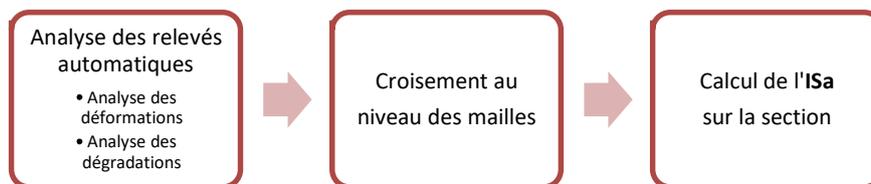
### 3.1 Principe

La nouvelle méthode proposée pour le calcul de l'indicateur structurel **ISa** s'appuie sur l'exploitation des surfaces de chaussées impactées par des dégradations spécifiques, déformations et fissuration, et comprend une phase de croisement surfacique pour identifier les zones présentant simultanément plusieurs pathologies.

Les dégradations sont quantifiées, classifiées, et localisées sur la surface de la voie ou de la chaussée selon la méthode proposée lors des travaux réalisés dans le cadre du thème 2 « Relevés automatisés – Descripteurs dégradation et méthode de classification ».

Les déformations sont exploitées quant à elle selon la méthode « Apport des appareils d'auscultation de type scanner pour la détection et la caractérisation en 3-D des déformations de chaussée routière », selon l'approche B, également élaborée dans le cadre du thème 2.

Pour ces deux méthodes, les dégradations et déformations sont analysées avec l'appui d'un maillage élémentaire. Le croisement des informations permet d'évaluer la qualité structurelle au niveau de chaque maille élémentaire. L'indicateur « ISa » est basé sur la quantification des mailles élémentaires au niveau section.



### 3.2 Données « entrantes »

Le calcul de l'indicateur structurel « ISa » s'appuie donc sur les informations suivantes :

- La fissuration,
- Les déformations.

Nous rappelons ci-après les traitements mis en œuvre pour la récupération de ces données.

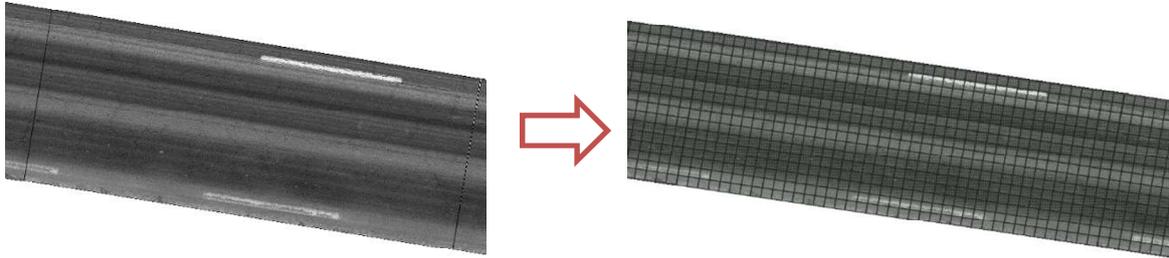
#### 3.2.1 Fissuration

La méthode s'appuie sur la première phase de l'exploitation des dégradations acquises par les systèmes d'acquisition de type LCMS, décrite dans le livrable « Relevés automatisés – Descripteurs Dégradation et méthode de classification ».

Cette phase consiste à agréger les données élémentaires disponibles avec l'exploitation des images « 3D » (fissuration en l'occurrence) en s'appuyant sur un maillage élémentaire qui couvre la surface de la voie.



Sur les « images chaussées 3D » de la chaussée recueillies lors de la phase d'acquisition, on superpose une grille d'analyse constituée de carrés (ou « mailles élémentaires ») de 25 cm de côté, dont l'un des bords est parallèle à l'axe de la chaussée.



Les dégradations détectées par les algorithmes de traitement d'images et de données laser font l'objet d'une quantification par maille élémentaire en s'appuyant sur les paramètres natifs fournis par les capteurs de relevés automatisés, ainsi que sur des informations complémentaires calculées :

- Longueur, valeur descriptive mesurée, ...
- Calcul de densité, ....

Les dégradations comprises dans chaque maille élémentaire font ensuite l'objet d'une analyse permettant d'exprimer un niveau de gravité par maille en fonction de seuils préétablis.

La gravité de la fissuration est exprimée par classe en s'appuyant sur la densité de fissuration. Quatre classes de fissuration ont été proposées ; les seuils retenus pour ces classes sont rappelés ci-dessous.

- Pour la densité de fissuration : calcul par maille, exprimé en  $m/m^2$  :
  - ■ **G1** : densité  $< 5 m/m^2$  ;
  - ■ **G2** : densité comprise entre 5 et  $10 m/m^2$  ;
  - ■ **G3** : densité supérieure ou égale à 10 à  $15 m/m^2$  ;
  - ■ **G4** : densité supérieure ou égale à  $15 m/m^2$ .

Nous présentons ci-dessous la visualisation des résultats obtenus, représentés visuellement avec ces niveaux G1 à G4 sur une section.



### 3.2.2 Déformations

La méthode s'appuie sur l'exploitation des déformations acquises par les systèmes d'acquisition de type LCMS, décrite dans le livrable DVDC « Apport des appareils d'auscultation de type « scanner » pour la détection et la caractérisation en 3-D des déformations de chaussée routière » selon l'approche B.

Le principe consiste à construire une nappe 3D de la chaussée avec une résolution de 5 cm et de calculer différents indicateurs exprimés en volume (cm<sup>3</sup>) par mailles élémentaires de 25 cm de côté.

Ce maillage de 25 cm de côté est identique au maillage élémentaire évoqué pour le traitement de la fissuration.



*Représentation visuelle de la nappe 3D : la hauteur est ici convertie en niveau de gris (256 valeurs possibles recouvrent 60 mm, centrées sur l'altitude moyenne de 10 m, et les éventuelles valeurs hors plage sont transparentes). La résolution est de 5 cm. On constate que les bandes de roulement sont clairement visibles.*

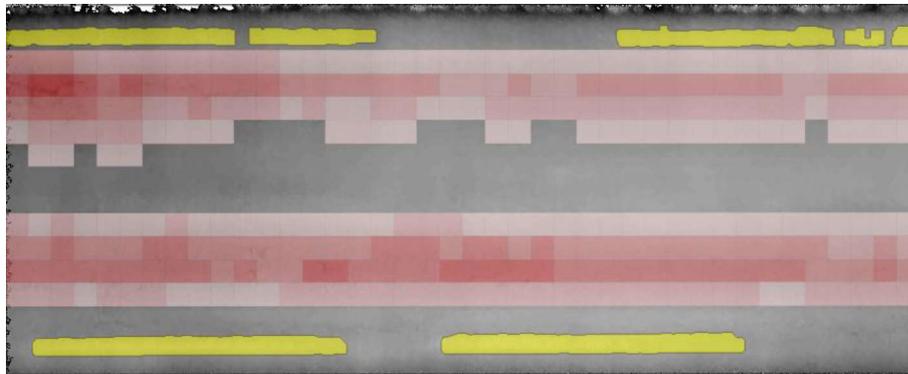
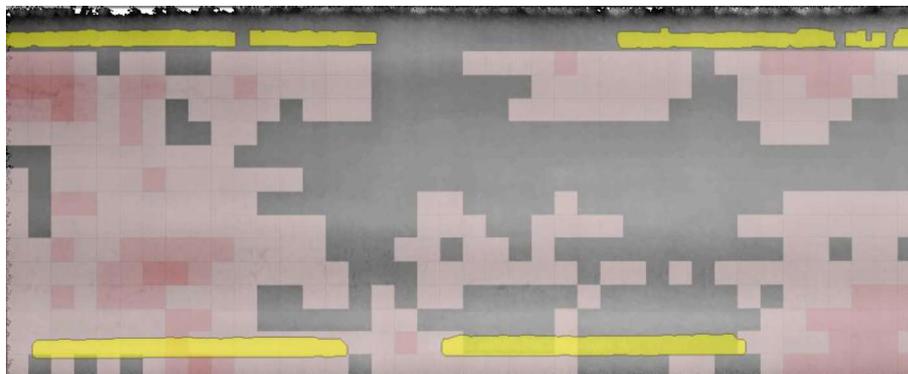
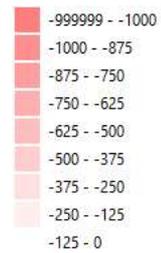
Dans le cadre de la méthode, les indicateurs calculés par maille de 25 cm de côté sont :

- **IM-B1** :  $V$  gonfles, bourrelets ( $\text{cm}^3$ ), volume excédentaire sur une règle glissante de 50 cm dans le profil en travers. Remarque : cet indicateur rend compte d'une étape de filtrage de phénomènes supposés de surface.
- **IM-B2** :  $C_{\max}$  gonfles, bourrelets (mm), correspond à la valeur maximale au-dessus de la règle glissante de 50 cm sur chacun des profils transversaux de la surface.
- **IM-B3** :  $V$  orniérage ( $\text{cm}^3$ ), volume sous une règle glissante de 1.5 m dans le profil en travers.
- **IM-B4** :  $C_{\max}$  orniérage (mm), correspond à la valeur maximale sous la règle glissante de 1.5 m sur chacun des profils transversaux de la surface.
- **IM-B5** :  $V$  aff. rive ( $\text{cm}^3$ ), volume relatif aux droites de régression caractérisant les affaissements de rive (négatif dans le cas d'un affaissement de rive, positif en cas d'excès de matière en rive).
- **IM-B6** :  $V L_3$  ( $\text{cm}^3$ ) volume sous une règle longitudinale de 3 m (indicateur simplifié représentatif du domaine des petites ondes de l'uni longitudinal).
- **IM-B7** :  $V L_{13}$  ( $\text{cm}^3$ ) volume sous une règle longitudinale de 13 m.
- **IM-B8** :  $V L_{13-L_3}$  ( $\text{cm}^3$ ) volume sous une règle longitudinale de 13 m réduit du volume sous une règle longitudinale de 3m (indicateur simplifié représentatif du domaine des moyennes ondes de l'uni longitudinal).

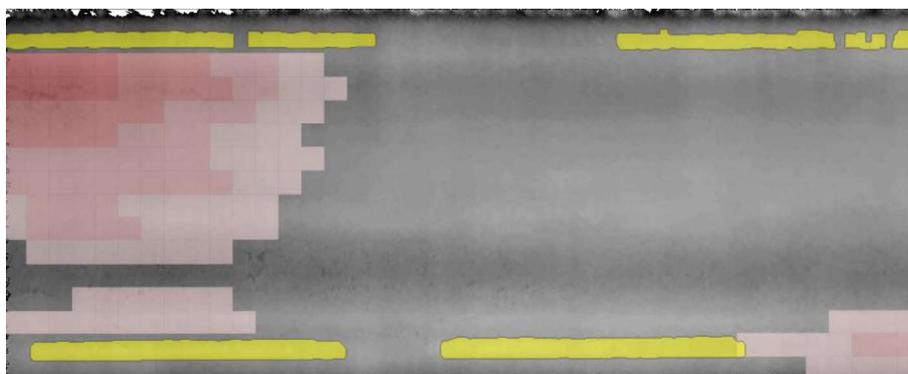
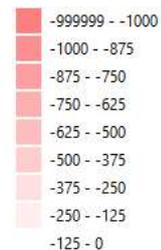
Parmi l'ensemble des indicateurs disponibles, seuls quelques indicateurs ont été retenus par le groupe de travail. Nous avons privilégié ceux relatifs à l'orniérage, à l'affaissement de rive et à l'uni longitudinal - ondes courtes à moyennes. Les indicateurs retenus sont ainsi :

- **IM-B3** :  $V$  orniérage
- **IM-B5** :  $V$  aff. Rive
- **IM-B6** :  $V L_3$
- **IM-B8** :  $V L_{13-L_3}$

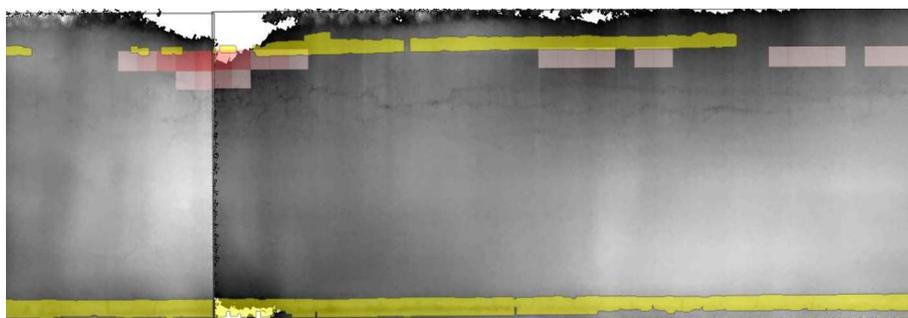
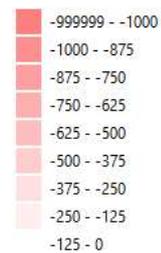
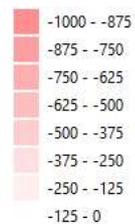
Les images ci-dessous montrent quelques exemples permettant de visualiser le type de défaut pris en compte pour le calcul de l'indicateur structurel. L'échelle affichée ici ne présage en rien des niveaux de gravité retenus. La première classe  $]-125 ; 0]$  n'est pas affichée pour mieux rendre compte de l'environnement. Le marquage détecté est visible en jaune.

IM-B3 V Orniérage (cm<sup>3</sup>)IM-B6 V L3 (cm<sup>3</sup>)

Volume PO

IM-B8 V L13-L3 (cm<sup>3</sup>)

Volume MO

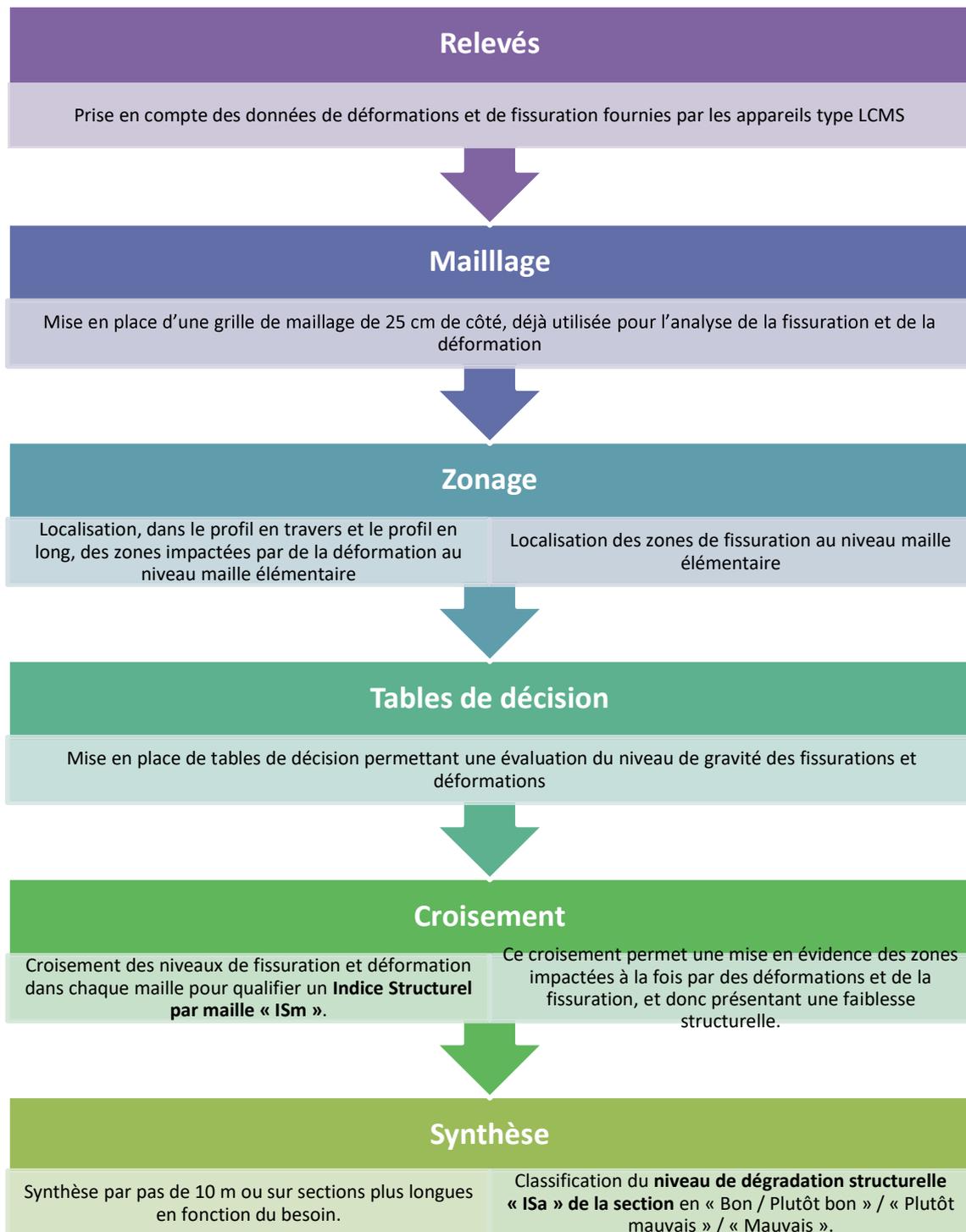
IM-B5 V aff. Rive (cm<sup>3</sup>)

*Remarque : les trois premiers exemples font référence à la même zone géographique alors que l'exemple relatif à l'affaissement de rive est localisé sur une autre zone.*

## 3.3 Calcul indicateur ISa : méthodologie

### 3.3.1 Principe

La méthodologie proposée pour le calcul de l'indicateur Structurel Automatique « ISa » s'appuie sur six étapes :



### 3.3.2 Etapes du calcul

#### 3.3.2.1 Traitements des déformations

Les déformations mesurées et calculées à partir des capteurs de mesures sont analysées selon le processus suivant :

- 1 -Traitement de type « Déformation » pour alimenter chaque maille de 25 cm de côté et identifier les secteurs présentant de la déformation sur la base des descripteurs proposés dans la méthode « Déformation » : utilisation de 4 tests qui alimentent chacun, un descripteur relatif au niveau mesuré :
  - Test 1 : Analyse de l'orniérage à la règle 1.5 m : descripteur « IM-B3 » ⇔ « Orni » ;
  - Test 2 : Analyse de l'affaissement de rive (uniquement sur le dernier mètre côté rive et pour des valeurs négatives) : descripteur « IM-B5 » ⇔ « AffRive » ;
  - Test 3 : Analyse du « Profil en long » à la règle 3 m ; fournit des défauts de type uni longitudinal en ondes courtes : descripteur « IM-B6 » ⇔ « Profil-Ig3m » ;
  - Test 4 : Analyse du « Profil en long » à la règle 13 m corrigée : descripteur « IM-B8 » ⇔ « Profil R13-R3 » (cf. documentation) ; fournit des défauts de type uni longitudinal en ondes moyennes :

Les descripteurs disponibles sont restitués par maille de 25 x 25 cm, sous forme d'une valeur exprimée en cm<sup>3</sup> qui correspond, pour chaque test réalisé, au volume de la déformation, calculé en fonction du test mis en œuvre (volume calculé sous la règle considérée pendant le test : 3 m ou 13 m). Pour faciliter son interprétation, cette valeur est convertie en « équivalent épaisseur », qui est la profondeur moyenne de la déformation sur la maille. Par exemple, un volume de 850 cm<sup>3</sup> pour une maille 25 cm de côté correspond à une épaisseur équivalente de 1,36 cm. Dans le cas d'un orniérage, cette valeur de 850 cm<sup>3</sup> correspond à une profondeur d'ornière d'environ 14 mm.

- 2 - Calcul d'une gravité de déformation élémentaire GDef\_EI associée à chaque maille en fonction des valeurs de déformations provenant des tests. Un indicateur « compilé » permettant de prendre en compte simultanément tous les indicateurs, associés à des coefficients pondérateurs permettra de déterminer une valeur caractéristique de déformation pour chaque maille.

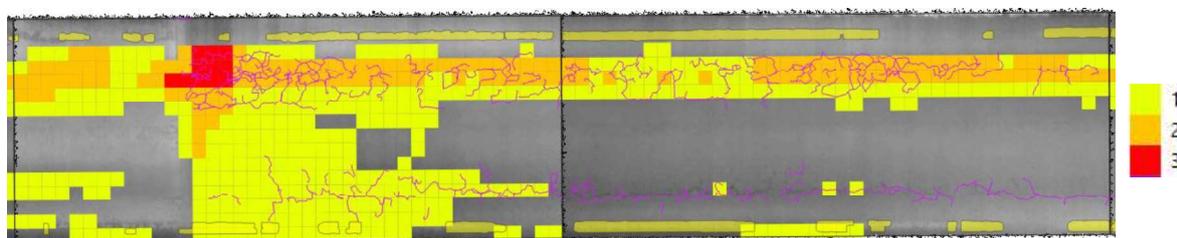
Par exemple :

$$GDef\_EI = (Orni) \times Coeff\ A + (AffRive) \times Coeff\ B + (Profil-Lg3m) \times Coeff\ C + (Profil\ R13-R3) \times Coeff\ D$$

Les coefficients permettent de « normaliser » les niveaux de gravités entre les différentes familles (gérer les échelles de volumes en cm<sup>3</sup> qui sont très différentes entre les descripteurs : les volumes associés au descripteur « Orni » sont plus faibles que ceux associés au descripteur « Profil R13-R3 » en cas de défaut au regard des longueurs des règles prises en compte). Par exemple les valeurs du descripteur « Profil R13-R3 » peuvent être gérées à l'aide d'un facteur de 0.25 comparativement au descripteur « Orni ».

Des seuils permettront ensuite de caractériser la gravité en G0, G1, G2 G3 en fonction de la valeur GDef\_EI.

Nous présentons ci-dessous un exemple de présentation cartographique des déformations en 3 gravités (hors G0) avec la présence ou non de fissures élémentaires.



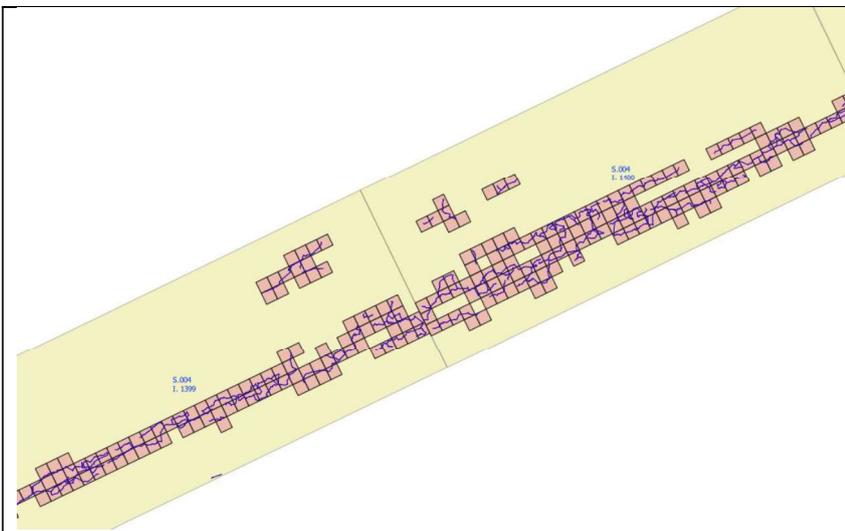
Sur cet exemple, les zones colorées sont proportionnelles au niveau de déformation, et traduisent les gravités. On visualise ainsi des zones plus ou moins déformées (Jaune, orange, rouge). Les zones grises (ni jaune, ni orange, ni rouge) sont des zones sans déformations.

On constate que **certaines zones peuvent présenter de la déformation sans fissuration et inversement.**

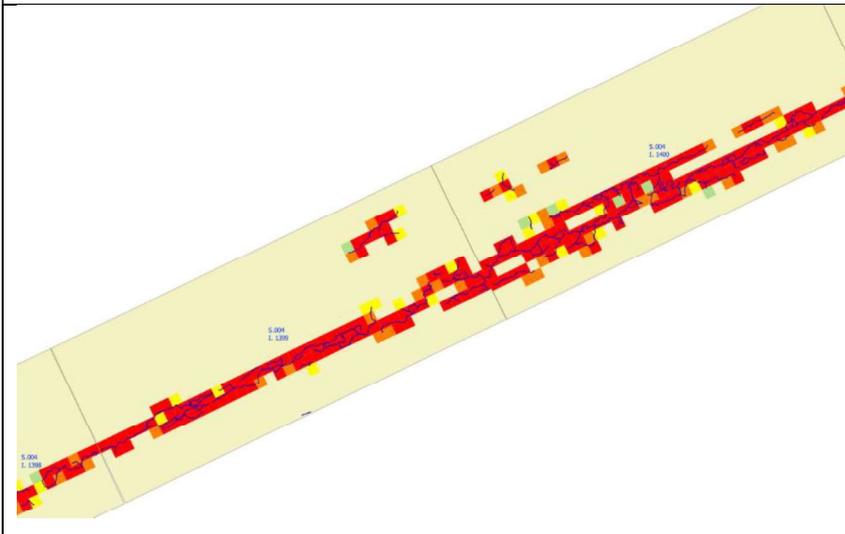
### 3.3.2.2 Traitement de la fissuration

La fissuration élémentaire fournie par les capteurs de mesure est traitée selon le processus suivant (traitement de la fissuration par maille puis agrégation pour obtenir des surfaces (méthode « DVDC » Dégradations) :

- Découpage de la voie par maille de 25 x 25 cm et calcul des descripteurs associés à la méthode ;
- Simplification : suppression des mailles négligeables, c'est-à-dire contenant moins de 1 cm de longueur de fissure ;
- Calcul d'une gravité de fissuration par maille **G1 à G4** (en fonction de la densité de fissures).



Sur cette image, on ne visualise que les carrés (roses) contenant de la fissuration (en bleu)



Sur cette image on visualise la gravité de fissuration associée à chaque maille

### 3.3.2.3 Qualification état structurel par maille ISm

Les mailles présentant des déficiences structurelles potentielles sont celles concernées par la présence de déformations, accompagnées ou non de fissuration.

L'indicateur « ISm » - Indice Structurel par maille - est calculé pour chaque maille élémentaire. Il s'appuie sur les gravités associées aux niveaux de déformation et de fissuration calculés précédemment et est établi selon la grille d'analyse suivante :

| Ism                 |   | Gravité fissuration |   |   |   |
|---------------------|---|---------------------|---|---|---|
|                     |   | 1                   | 2 | 3 | 4 |
| Gravité déformation | 0 | 0                   | 0 | 1 | 1 |
|                     | 1 | 1                   | 1 | 2 | 2 |
|                     | 2 | 2                   | 2 | 2 | 3 |
|                     | 3 | 3                   | 3 | 3 | 3 |

L'« étalonnage » de la grille est le suivant :

- Niveau 3 : défaut structurel ;
- Niveau 2 : forte présomption de défaut structurel ;
- Niveau 1 : surveillance : présence potentielle de défaut structurel ;
- Niveau 0 : pas de défaut structurel visible.

A partir de l'état structurel par maille qui est déterminé ainsi, nous pouvons alors calculer l'Isa, à l'échelle de la section.

### 3.3.3 Notation ISa

La notation « ISa » est exprimée en fonction de 4 niveaux :

- Bon
- Plutôt bon
- Plutôt mauvais
- Mauvais

Elle peut être établie au niveau d'une image (pas de 10 m en général), ou sur une section plus longue.

Elle est établie selon le processus suivant :

- Addition des surfaces (mailles élémentaires) par gravité d'ISm (0 à 3) sur la zone considérée ;
- Calcul des surfaces cumulées en % de surface auscultée par gravité ;

A ce niveau on dispose déjà d'une visualisation de l'état global de la section sous la forme d'une notation en % composée de 4 valeurs reflétant l'état structurel de la chaussée.

|                | surf (m <sup>2</sup> ) | % surf |
|----------------|------------------------|--------|
| Surface ISm G0 | 350                    | 88%    |
| Surface ISm G1 | 0                      | 0%     |
| Surface ISm G2 | 150                    | 12.5%  |
| Surface ISm G3 | 0                      | 0%     |

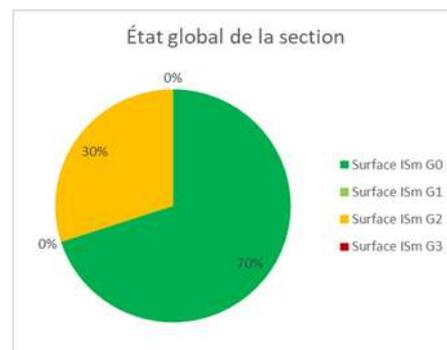
Deux procédures peuvent ensuite être mise en œuvre pour établir la notation :

- **Procédure A** : mise en place d'un indicateur compilé « Et\_ST » qui permet, après seuillage, de classer la section en fonction de 4 niveaux de gravité « Bon / Plutôt bon / Plutôt mauvais / Mauvais ».

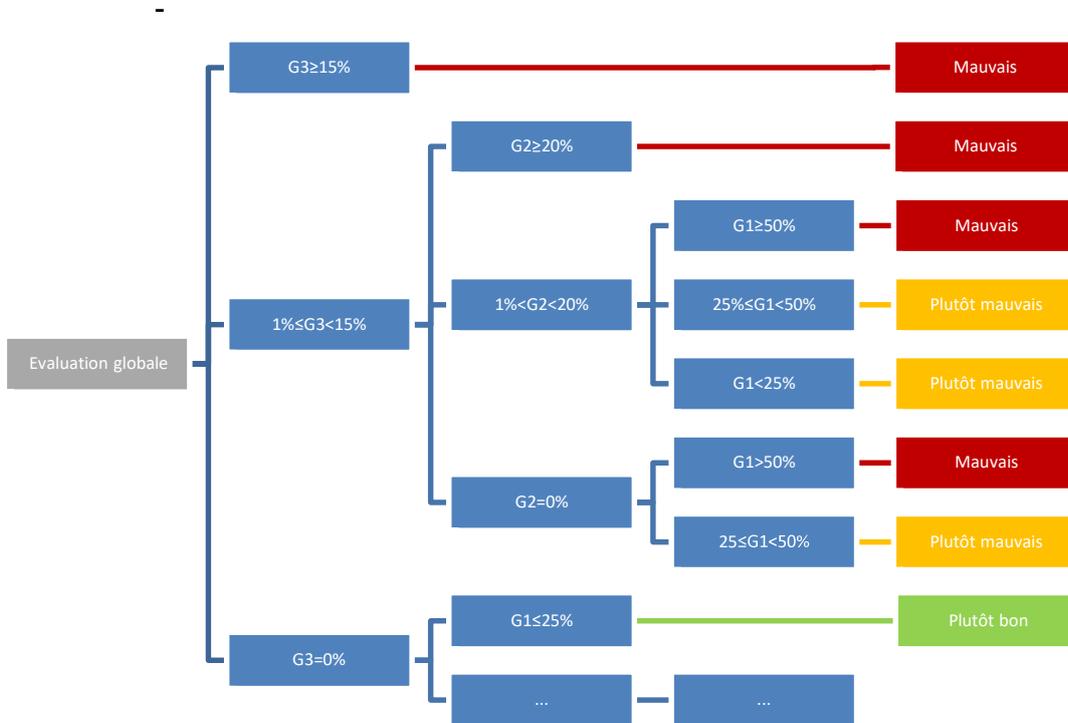
$$Et\_ST = 100 \times \frac{\%Surf\ G0 \times Coef\ 0 + \%Surf\ G1 \times coef1 + \%Surf\ G2 \times coef\ 2 + \%Surf\ G3 \times coef\ 3}{Somme\ des\ coef}$$

(Les coefficients 0 à 3 et seuils 1 à 3 restent à définir).

| Et_St                 | ISs            |
|-----------------------|----------------|
| < Seuil 1             | Bon            |
| entre Seuil 1 seuil 2 | Plutôt Bon     |
| entre Seuil 2 seuil 3 | Plutôt Mauvais |
| Supérieur à seuil 3   | Mauvais        |



- **Procédure B** : mise en place d'une grille de décision permettant d'interpréter les % de gravité ISm G3 à ISm G0 pour classement selon les niveaux Bon à Mauvais. Exemple ci-dessous.



**Remarque**

*Le choix de la procédure A ou B n'a pas été tranché dans le cadre de la présente réflexion. Des tests sur sections seront à mettre en place pour valider si l'une ou l'autre est plus pertinente dans sa mise en œuvre.*

## 4 Conclusion

Les objectifs affichés par ce groupe de travail consistaient à élaborer un indicateur basé sur les relevés des systèmes automatisés, à le mettre en œuvre sur une ou des sections tests et à le mettre en relation avec la déflexion usuellement retenue comme indicateur structurel.

Concernant son élaboration, la démarche proposée pour le calcul de l'indicateur Structurel « ISa » s'appuie sur les travaux précédemment réalisés par les différents groupes de travail du thème 2. Elle prend notamment en compte l'utilisation d'un maillage à partir duquel sont exploitées les données de fissuration et de déformation, elles-mêmes exploitées à partir de gravités associées.

Conformément à la demande, le présent livrable propose des principes de calcul permettant de fournir une note d'état structurel à partir de relevés automatisés.

### *Remarque :*

*Dans ce premier travail, toutes les mailles élémentaires (carrés de 0,25 m x 0,25 m de côté) sont utilisées pour alimenter l'indicateur structurel : les mailles et classifications « ISm » isolées sont donc conservées et aucune agrégation n'est réalisée pour obtenir une surface minimale d'analyse. Un complément d'étude permettra de vérifier l'intérêt ou non de supprimer les mailles isolées, et de proposer des traitements permettant d'agréger les mailles contiguës pour ne travailler que sur des surfaces significatives.*

En revanche, l'épreuve de cet indicateur n'a pu être effectuée sur planches d'essais, épreuve importante puisqu'elle devra en particulier permettre le calage des différents seuils et coefficients qui sont nécessaires à sa mise en œuvre.

Enfin, la prise en compte de la relation avec la déflexion a été abordée de manière différente en proposant une démarche globale de qualification de l'état structurel d'une chaussée en combinant de manière modulaire les dégradations structurelles (pas forcément relevées de manière automatisée) avec la déflexion lorsque celle-ci est connue. Ce projet d'indicateur structurel modulaire, proposé de façon complémentaire en annexe du présent rapport, reste également à éprouver.

## 5 Annexes

### 5.1 Indicateur Structurel standard IS

Nous pouvons d'ores et déjà signaler que ce travail, bien que fructueux en idées, n'a pas abouti à l'élaboration d'un indicateur structurel universel, car le groupe de travail s'est heurté à des impasses et n'a pas pu les résoudre dans le temps imparti.

Nous souhaitons signaler qu'aucun indicateur structurel universel n'existe actuellement, comme cela a été rappelé en livrable du thème précédent « Etude sur les indices structurels ». Des indicateurs existent cependant pour certains contextes spécifiques comme par exemple l'IQRN.

Le groupe de travail a donc travaillé sur la pertinence d'avoir un indicateur structurel universel, et quel usage pourrait en être fait. Ces discussions, nous ont mené à l'élaboration d'un cheminement de construction d'un indicateur universel qui pourra être continué à l'avenir et que nous allons présenter ici.

Nous avons par la suite réfléchi à l'inverse, en partant des usages possibles de cet indicateur, pour élaborer le détail de l'indicateur et proposer une méthode flexible, qui permettrait à la fois de poser les bases de la compréhension des objectifs et des résultats possibles d'un indicateur structurel, mais aussi de laisser la liberté à l'utilisateur de cet indicateur de l'adapter à son besoin.

Une réflexion a également été poussée plus avant sur le croisement des relevés de fissurations et déformations pour obtenir une interprétation technique plus pertinente.

#### 5.1.1 Principe

La définition de ce qu'est un indicateur structurel est intrinsèquement lié à l'utilisation qui va en être faite.

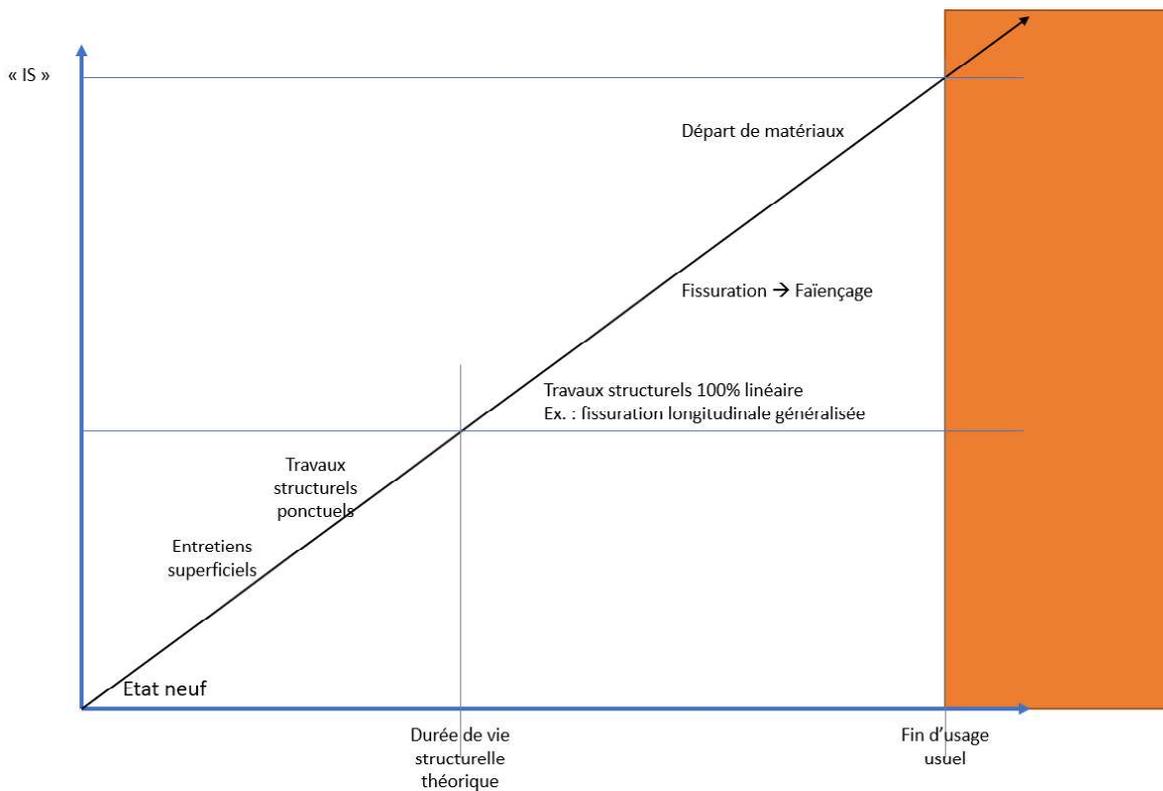
On peut voir sur le graphique suivant, élaboré au cours du travail du groupe, qu'au fur et à mesure de la vie d'une chaussée ou d'un réseau, l'utilisation d'un indicateur structurel varie : il peut servir ponctuellement, ou globalement, et être utilisé de manière globale pour prévoir des entretiens ou bien à l'échelle des sections pour déterminer quelles dégradations sont présentes et prioriser selon l'état structurel.

L'indicateur structurel exprime la condition structurelle d'une chaussée depuis son état neuf jusqu'à l'état ultime qui ne permet plus de remplir son usage de manière satisfaisante (critères de confort, sécurité, etc.).

L'état ultime ne sera pas forcément atteint pour tout type de chaussée (politiques différentes, et niveaux de criticité dépendant du réseau).

La méthode d'évaluation de cet indicateur est très variable en fonction des informations disponibles, de l'usage que l'on souhaite en faire, et la prise en compte du contexte local et du patrimoine.





Il est important de rappeler que le travail sur un tel indicateur ne peut se faire qu'avec des données de qualité, qui ne sont pas toujours disponibles chez les gestionnaires.

Nous en sommes donc venus à l'élaboration d'un indicateur structurel modulaire, qui permettrait de manière flexible, en fonction des informations disponibles, de déterminer une classe structurelle de chaussées.

Cet indicateur modulaire permettrait ainsi, puisque ses composants sont nativement compatibles avec le reste des travaux de DVDC, d'avoir une vision objective sur l'état structurel d'une chaussée, aussi précise que la disponibilité des informations le permet.

Ne pas fournir de seuils ou de pondérations permet de garder une certaine flexibilité dans la conception d'indicateurs personnalisés en fonction du contexte du réseau ; ces seuils sont à adapter par le gestionnaire en fonction de ses objectifs et en fonction des données dont il dispose. Ces seuils sont également à adapter en fonction de la structure de chaussée et autres critères pertinents localement.

Le groupe souhaitait fournir une explication de l'impact de la prise en compte de manière disproportionnée d'un indicateur élémentaire, et donner des lignes de conduite pour l'élaboration d'un indicateur équilibré.

De ce travail est ressorti également le fait que la création d'un indicateur structurel passe par l'élaboration d'indicateurs « intermédiaires » potentiellement très utiles pour le gestionnaire : par exemple le croisement des déformations et de l'intégrité superficielle donne un indicateur de « potentiel de dégradation ».

### 5.1.2 Entrants

Les indicateurs utilisés sont ceux définis dans les groupes de travail précédent, notamment de relevés automatiques mais aussi qui ont été élaborés dans la nouvelle méthode 38-2. Nous intégrons également, à cause de leur valeur importante dans le cadre de l'évaluation de l'état structurel d'une chaussée, les déflexions et rayons de courbure.

Tous ces indicateurs ne sont pas nécessaires pour établir un indicateur tel que nous l'imaginons, cependant plus les informations et mesures disponibles sont nombreuses, plus l'indicateur sera précis.

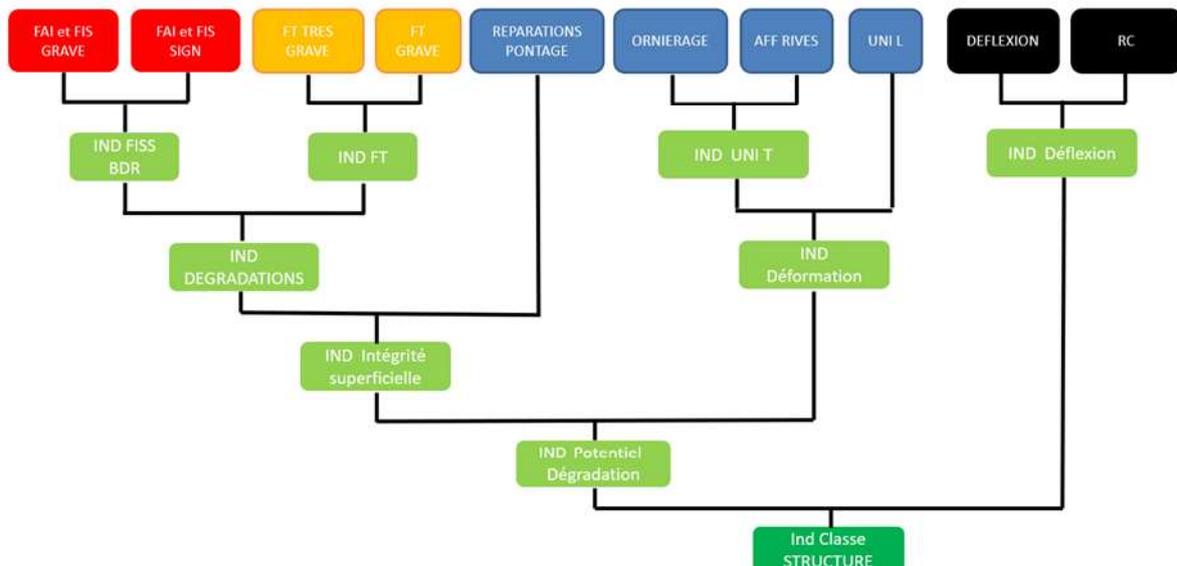
De la même façon, et cela est vrai pour tout indicateur, ils convient de ne prendre en compte que les données fiables dans le calcul d'un indicateur structurel. Son impact peut en effet être important, et à chaque étape de calcul les erreurs éventuelles s'accumuleraient.

Nous retrouvons ainsi dans nos paramètres d'entrée :

- Les dégradations
- Les déformations transversales et longitudinales
- Les réparations
- Les déflexions et rayons de courbure

Nous retrouvons ainsi plus de détails que dans l'indicateur structurel ISa proposé plus en amont ; cette démarche en est alors complémentaire.

A titre d'exemple, nous avons établi un arbre représentant un ordre de prise en compte de chacun de ces indicateurs élémentaires. Nous concaténons ainsi :



Chaque indicateur intermédiaire peut ainsi :

- Etre évalué sur de la donnée objective ;
- Etre évalué ou estimé de manière indépendante ;
- Etre inféré depuis des évaluations précédentes et des lois d'évolution ;
- Ne pas être pris en compte du tout : un nouvel arbre peut être établi.

La possibilité existe alors pour le gestionnaire de choisir sur quelles informations il apportera le plus de moyens pour obtenir des données de qualité.

L'avantage d'un arbre complet est d'avoir la possibilité d'une vision très détaillée lorsque l'on rentre dans le détail de chacun des indicateurs intermédiaires, et de pouvoir retracer les raisons d'une évaluation structurelle spécifique.

Le désavantage, c'est que plus on avance dans l'arbre de décision, plus forcément chaque détail est lissé. Il est alors important de comprendre l'impact des choix que l'on fait dans les arbres de décision.

### 5.1.3 Table de décision

Pour chacun des indicateurs élémentaires, et pour les différents types de chaussées existants, on doit différencier les valeurs seuils pour chacun des indicateurs élémentaires.

En effet, par exemple, sur une chaussée de type « GTLH », un niveau de déflexion élevé sera forcément plus « grave » et donc déclencheur de la sélection d'une gravité élevée, par rapport à la même valeur de déformabilité relevée sur une chaussée souple.

Tous les indicateurs élémentaires font donc l'objet de l'établissement de tableaux présentant les seuils choisis pour l'évaluation des niveaux de gravités.

| Gravité fissuration                               |  |        |         | Gravité réparations |        |         |                          | Gravité Déflexion et Rayon de Courbure |             |                       |             |             |      |      |     |      |      | Déformations |      |  |         |         |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
|---|--|--------|---------|---------------------|--------|---------|--------------------------|--|-------------|-----------------------|-------------|-------------|------|------|-----|------|------|--------------|------|--|---------|---------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|------|----|
| Chaussées BE et souples                           | Fissuration et Falaises BDR significatif |        |         | FF graves / 100m    |        |         | Réparation en BDR        |  |             | Déflexion (en mm/200) |             |             |      |      |     |      |      |              |      | Equit = (NG1 * 1 + %G2 * 2 + %G3 * 3 + %G4 * 4) / (1+2+3+4) / 30 |         |         |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
|   | % Mini                                   | % Maxi | Gravité | % Mini              | % Maxi | Gravité | % Mini                   | % Maxi                                 | Gravité     | Classe                | Valeur mini | Valeur Maxi | T0   | T1   | T2  | T3   | T4   | T5           | Mini | Maxi   | Gravité |         |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
|   | 0  | 5      | G1      | 0                   | 2      | G1      | 0                        | 20                                     | G1          | D1                    | 0           | 20          | G1   | G1   | G1  | G1   | G1   | G1           | 0    | 1  | 1       | G1      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
|   | 5  | 10     | G2      | 2                   | 10     | G2      | 10                       | 30                                     | G2          | D2                    | 20          | 30          | G1   | G1   | G1  | G1   | G1   | G1           | 1    | 2  | 2       | G2      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
| 10  | 30                                       | G3     | 10      | 100                 | G3     | 30      | 100                      | G3                                     | D3          | 30                    | 45          | G1          | G1   | G1   | G1  | G1   | G1   | 2            | 3    | 3  | G3      |         |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
| 30  | 100                                      | G4     | 100     | 100                 | G4     | 100     | 100                      | G4                                     | D4          | 45                    | 75          | G2          | G2   | G2   | G2  | G2   | G2   | 3            | 4    | 4  | G4      |         |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
| Chaussées à joints traités aux bords hydrauliques | Fissuration et Falaises BDR significatif |        |         | FF graves / 100m    |        |         | Rayon de courbure (en m) |  |             |                       |             |             |      |      |     |      | Mini |              |      |  | Maxi    | Gravité |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |      |    |
|   | % Mini                                   | % Maxi | Gravité | % Mini              | % Maxi | Gravité | Classe                   | Valeur mini                            | Valeur Maxi | Gravité               | R1          | 0           | 200  | G1   | R2  | 200  | 400  | G2           | R3   | 400  | 800     | G3      | R4   | 800 | 1200 | G4   | R5  | 1200 | 1800 | G4  | R6   | 1800 | 1800 | G4 |
|   | 0  | 5      | G1      | 0                   | 0      | G1      | R1                       | 0                                      | 200         | G1                    | 0           | 200         | G1   | 0    | 200 | G1   | 0    | 200          | G1   | 0  | 200     | G1      | 0    | 200 | G1   | 0    | 200 | G1   | 0    | 200 | G1   | 0    | 200  | G1 |
|   | 5  | 10     | G2      | 0                   | 2      | G2      | R2                       | 200                                    | 400         | G2                    | 200         | 400         | G2   | 200  | 400 | G2   | 200  | 400          | G2   | 200  | 400     | G2      | 200  | 400 | G2   | 200  | 400 | G2   | 200  | 400 | G2   | 200  | 400  | G2 |
| 10  | 30                                       | G3     | 2       | 100                 | G3     | R3      | 400                      | 800                                    | G3          | 400                   | 800         | G3          | 400  | 800  | G3  | 400  | 800  | G3           | 400  | 800  | G3      | 400     | 800  | G3  | 400  | 800  | G3  | 400  | 800  | G3  | 400  | 800  | G3   |    |
| 30  | 100                                      | G4     | 10      | 100                 | G4     | R4      | 800                      | 1200                                   | G4          | 800                   | 1200        | G4          | 800  | 1200 | G4  | 800  | 1200 | G4           | 800  | 1200   | G4      | 800     | 1200 | G4  | 800  | 1200 | G4  | 800  | 1200 | G4  | 800  | 1200 | G4   |    |
| 100   | 100                                      | G4     | 100     | 100                 | G4     | R5      | 1200                     | 1800                                   | G4          | 1200                  | 1800        | G4          | 1200 | 1800 | G4  | 1200 | 1800 | G4           | 1200 | 1800   | G4      | 1200    | 1800 | G4  | 1200 | 1800 | G4  | 1200 | 1800 | G4  | 1200 | 1800 | G4   |    |
| 100   | 100                                      | G4     | 100     | 100                 | G4     | R6      | 1800                     | 1800                                   | G4          | 1800                  | 1800        | G4          | 1800 | 1800 | G4  | 1800 | 1800 | G4           | 1800 | 1800   | G4      | 1800    | 1800 | G4  | 1800 | 1800 | G4  | 1800 | 1800 | G4  | 1800 | 1800 | G4   |    |

Dans notre fichier de travail, qui est un simulateur, nous laissons bien sûr ces seuils libres en modification, car comme déjà mentionné, ils sont caractéristiques des choix d'évaluation réalisés sur un réseau particulier, et seront donc à amender localement.

Pour chacun des indicateurs élémentaires, nous choisissons d'attribuer quatre niveaux de gravité :

- ■ **G1** : très bon
- ■ **G2** : bon
- ■ **G3** : mauvais
- ■ **G4** : très mauvais

### 5.1.4 Logigramme

L'étape suivante est d'établir, pour suivre l'ordre de l'arbre de décision précédemment mentionné, le détail des croisements de tous les indicateurs élémentaires, pour obtenir les indicateurs intermédiaires.

En descendant l'arbre de décision, nous avons alors travaillé à croiser en premier :

- Les fissurations et faïençages en BDR
- Les fissurations transversales : graves et très graves

Ce travail nous donne alors deux indicateurs intermédiaires, que nous pouvons à nouveau croiser pour obtenir un « indicateur dégradations ».

Ce travail est alors répété jusqu'à la fin de l'arbre de décision.

Les tables de correspondance doivent faire écho de la réalité du comportement structure d'une chaussée, et sont uniques quelle que soit sa structure : en effet cela a été pris en compte au moment de l'établissement des seuils, dans l'étape précédente.

A cette étape, on voit bien que quel que soit le type de structure, si on croise :

- Un état de fissuration en bandes de roulement très mauvais
- Avec un état quelconque de fissuration transversale

On obtiendra un indicateur de dégradations très mauvais.

| DEGRADATIONS                              |    |    |    |    | DEFORMATIONS / DEFLEXION         |          |          |          |          | GLOBAL   |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
|---|----|----|----|----|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|--|------------------|------------------|--|----|----|-------------|------------------|------------------|------------------|----|----|
| <b>Indicateur Fissuration BDR</b>         |    |    |    |    | <b>Indicateur Uni Trans</b>      |          |          |          |          | <b>Indicateur du potentiel de dégradation structurelle</b> |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| Fissuration et Fal BDR grave              |    |    |    |    | Affaissement                     |          |          |          |          | Indicateur de dégradation structurelle                     |                  |                  | Indicateur de dégradation structurelle |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| G4  | G4 | G3 | G2 | G1 | Abs Def                          | G4       | G3       | G2       | G1       | G4   | G3               | G2               | G1                                     | -  | G4 | G3          | G2               | G1               | -                |    |    |
| G4  | G4 | G4 | G4 | G3 | G4                               | G4       | G4       | G4       | G4       | G4   | G4               | G4               | G3                                     | G3 | G4 | G4          | G4               | G4               | G4               |    |    |
| G3  | G4 | G4 | G3 | G3 | G3                               | G3       | G4       | G4       | G3       | G3   | G4               | G4               | G3                                     | G2 | G3 | G4          | G4               | G3               | G3               |    |    |
| G2  | G4 | G3 | G2 | G2 | G2                               | G2       | G4       | G3       | G2       | G2   | G4               | G3               | G2                                     | G1 | G2 | G4          | G3               | G2               | G1               |    |    |
| G1  | G4 | G3 | G2 | G1 | G1                               | G2       | G4       | G3       | G2       | G1   | G4               | G3               | G2                                     | G1 | G1 | G4          | G3               | G2               | G1               |    |    |
| <b>Indicateur Fissuration Trans</b>       |    |    |    |    | <b>Indicateur Déformations</b>   |          |          |          |          | <b>Indicateur Classe Structurelle</b>                      |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| FT Très grave                             |    |    |    |    | Indicateur Uni Trans             |          |          |          |          | Indicateur du potentiel de dégradation structurelle        |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| G4  | G4 | G3 | G2 | G1 | Abs UNIR                         | G4       | G3       | G2       | G1       | G4   | G3               | G2               | G1                                     | G4 | G3 | G2          | G1               | G4               | G3               | G2 | G1 |
| G4  | G4 | G4 | G4 | G3 | G4                               | G4       | G4       | G4       | G4       | G4   | G4               | G4               | G3                                     | G3 | G4 | 4-Mauvais   | 4-Mauvais        | 3-Plutot Mauvais | 3-Plutot Mauvais |    |    |
| G3  | G4 | G4 | G3 | G3 | G3                               | G3       | G4       | G4       | G3       | G3   | G4               | G4               | G3                                     | G2 | G3 | 4-Mauvais   | 4-Mauvais        | 3-Plutot Mauvais | 3-Plutot Mauvais |    |    |
| G2  | G4 | G3 | G2 | G1 | G2                               | G2       | G4       | G3       | G2       | G2   | G4               | G3               | G2                                     | G1 | G2 | Plutot Mauv | 3-Plutot Mauvais | 2-Plutot Mauvais | 2-Plutot Mauvais |    |    |
| G1  | G4 | G3 | G2 | G1 | G1                               | G2       | G4       | G3       | G2       | G1   | G4               | G3               | G2                                     | G1 | G1 | Plutot Mauv | 2-Plutot Bon     | 2-Plutot Bon     | 1-Bon            |    |    |
| <b>Indicateur Dégradation</b>             |    |    |    |    | <b>Indicateur Déflexion / RC</b> |          |          |          |          | <b>Indicateur Etat Intégré surfacique</b>                  |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| Indicateur Fissuration Trans              |    |    |    |    | RC                               |          |          |          |          | Indicateur Etat Intégré surfacique                         |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| G4  | G4 | G3 | G2 | G1 | G3                               | G2       | G1       | Abs Defl | G4       | G3   | G2               | G1               | G4                                     | G3 | G2 | G1          | G4               | G3               | G2               | G1 |    |
| G4  | G4 | G4 | G4 | G4 | G3                               | *        | *        | G3       | Abs Defl | G4   | G4               | G4               | G4                                     | G3 | G4 | G4          | G4               | G3               | G4               | G4 | G4 |
| G3  | G4 | G4 | G4 | G3 | G2                               | *        | *        | G2       | Abs Defl | G3   | G3               | G4               | G3                                     | G2 | G4 | G3          | G3               | G2               | G4               | G3 | G2 |
| G2  | G4 | G3 | G2 | G1 | G1                               | G3       | G2       | G1       | Abs Defl | G2   | G2               | G4               | G3                                     | G1 | G4 | G3          | G2               | G1               | G4               | G3 | G2 |
| G1  | G3 | G3 | G2 | G1 | Abs Defl                         | Abs Defl | Abs Defl | Abs Defl | Abs Defl | G1   | G2               | G4               | G3                                     | G1 | G4 | G3          | G2               | G1               | G4               | G3 | G2 |
| <b>Indicateur Etat Intégré surfacique</b> |    |    |    |    | <b>Indicateur Dégradations</b>   |          |          |          |          | <b>Indicateur Classe Structurelle</b>                      |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| Réparation BDR                            |    |    |    |    | Indicateur Dégradations          |          |          |          |          | Indicateur du potentiel de dégradation structurelle        |                  |                  |  |    |    |             |                  |                  |                  |    |    |
| G3  | G4 | G4 | G4 | G3 | G4                               | G3       | G2       | G1       | G4       | G3   | G2               | G1               | G4                                     | G3 | G2 | G1          | G4               | G3               | G2               | G1 |    |
| G2  | G4 | G4 | G4 | G3 | G3                               | G4       | G3       | G2       | G3       | 4-Mauvais  | 4-Mauvais        | 3-Plutot Mauvais | 3-Plutot Mauvais                       | G3 | G4 | G4          | G4               | G3               | G4               | G4 | G4 |
| G1  | G4 | G4 | G4 | G3 | G2                               | G4       | G3       | G2       | G2       | Plutot Mauv  | 3-Plutot Mauvais | 2-Plutot Mauvais | 2-Plutot Mauvais                       | G1 | G4 | G3          | G2               | G1               | G4               | G3 | G2 |
| G1  | G4 | G3 | G2 | G1 | G1                               | G4       | G3       | G2       | G1       | Plutot Mauv  | 2-Plutot Bon     | 2-Plutot Bon     | 1-Bon                                  | G1 | G4 | G3          | G2               | G1               | G4               | G3 | G2 |

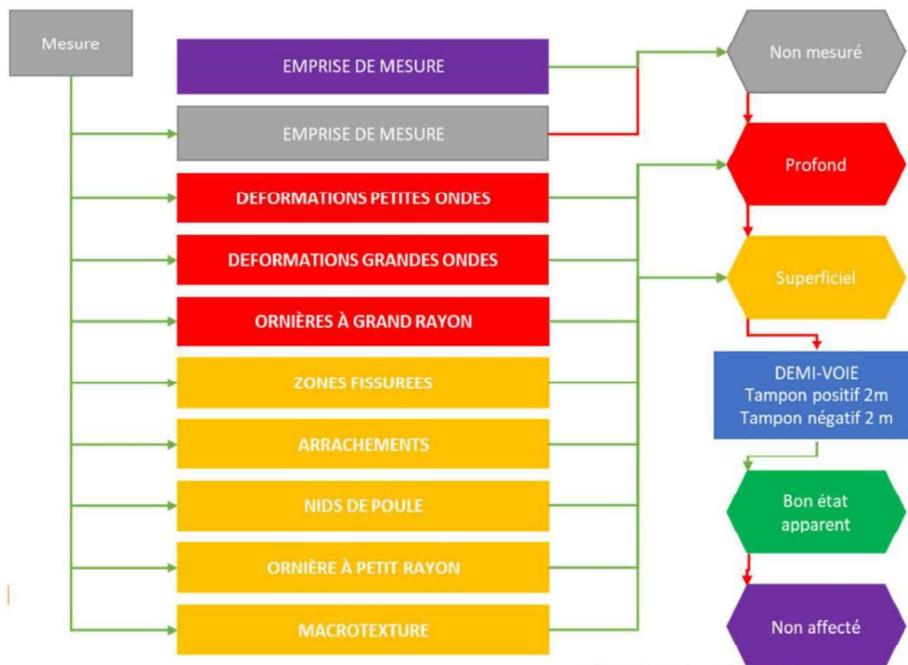
Cas non rencontrés, car on prend soit la déflexion, soit le RC selon le réseau



## 5.2 Démarche CEREMA – Aigle3D – Réseau National

Nous invitons le lecteur à se référer au document relatif à la méthodologie mise en place pour le calcul de l'indicateur structurel associé à l'exploitation des données Aigle3D.

Les dégradations et déformations mesurées font l'objet de traitements permettant d'évaluer les surfaces de chaussées impactées par chaque type de dégradation. Selon leur origine et leur importance, elles alimentent différents indicateurs, selon la logique présentée ci-dessous :



L'indicateur « Profond » traduit le niveau de dégradation structurel de la chaussée. Il est exprimé en pourcentage de surface de chaussée impactée par segment de 200 m.

Nous présentons ci-dessous un exemple de représentation proposé par le CEREMA.

