



## **APPORT DU FORMALISME DES GRAPHEs CONCEPTUELS POUR LA SELECTION INTELLIGENTE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ROUTIERE**

*S. NDIINGA OKINA<sup>1</sup>, L. AHOUEt<sup>1, 2, 3</sup>, F. TAHILLANDIER<sup>4</sup>,  
D. BREYSSE<sup>5</sup>, P. LOUZOLO-KIMBEMBE<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Univ. Marien Nguouabi, ENSP, BP.69, Brazzaville, Congo

<sup>2</sup> Univ. Denis Sassou Nguesso, ISAUBTP, Kintélé Congo.

<sup>3</sup> Bureau de Contrôle du Bâtiment et Travaux Publics (BCBTP), Brazzaville, Congo

<sup>4</sup> INARE, Univ. Aix Marseille, RECOVER, Aix -en-Provence, France

<sup>5</sup> Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33405 Talence, France

E-mail : sylvain.ndingaokina@umng.cg

---

### **RESUME**

*L'aménagement des routes et des pistes rurales requiert l'usage des matériaux qui répondent aux exigences des normes en la matière. Cela implique une bonne connaissance des matériaux meubles des gisements. Le choix approprié des matériaux après leur caractérisation au laboratoire doit contribuer à la réduction des coûts de construction et des temps d'interprétation des études. Les études géotechniques des matériaux génèrent souvent de grands volumes de données hétérogènes (ex., propriétés des sols) qui doivent être interprétés de manière pertinente en accord avec les exigences normatives. La modélisation numérique incluant des algorithmes mathématiques peut faciliter la sélection intelligente des données sur les matériaux d'emprunt. La méthode des graphes conceptuels est une des approches de l'intelligence artificielle qui semble pertinente pour traiter et exploiter de grandes masses de données disparates. Cette approche consiste à la modélisation graphique et permet un apprentissage automatique sur la base des données d'essais géotechniques et de la connaissance experte, ce qui réduit les temps d'analyses ainsi que les coûts associés. Cet article présente le travail de formalisation et d'unification des données géotechniques disponibles sur les sols routiers au Congo pour une sélection intelligente des gisements étudiés et la capitalisation de leurs connaissances. L'intérêt de l'approche est illustré sur les sols de construction routière de la route Obouya-Boundji-Okoyo.*

---

**Mots-clés :** Modélisation graphique, Inférence graphique, Construction routière, Essais géotechniques, Modèle de connaissance

---

### **ABSTRACT**

*The construction of roads and rural tracks requires the use of materials that meet the requirements of current standards. This implies a good knowledge of loose materials of borrow. The appropriate choice of materials after their characterization in the laboratory should contribute to the reduction of construction costs and the time required for the interpretation of the studies. Geotechnical materials investigations often generate large volumes of heterogeneous data (e.g. soil properties) that need to be interpreted in a meaningful way according to normative requirements. The numerical modelling including mathematical algorithms can facilitate the intelligent selection the data on the borrow materials. The conceptual graph method is one of the approaches of artificial intelligence, which seems to be relevant to process and exploit large masses of disparate data. This approach consists of graphical modelling and allows automatic learning on the basis of geotechnical test data and expert knowledge,*

*which reduces analysis times and associated costs. This article presents the work of formalizing and unifying the geotechnical data available on road soils in Congo for an intelligent selection of the deposits studied and the capitalization of their knowledge. The interest of the approach is illustrated on the road construction soils of the Obouya-Boundji-Okoyo road.*

---

**Keywords :** *Graphic modelling, Graphic inference, Road construction, Geotechnical testing, Knowledge model*

---

## INTRODUCTION

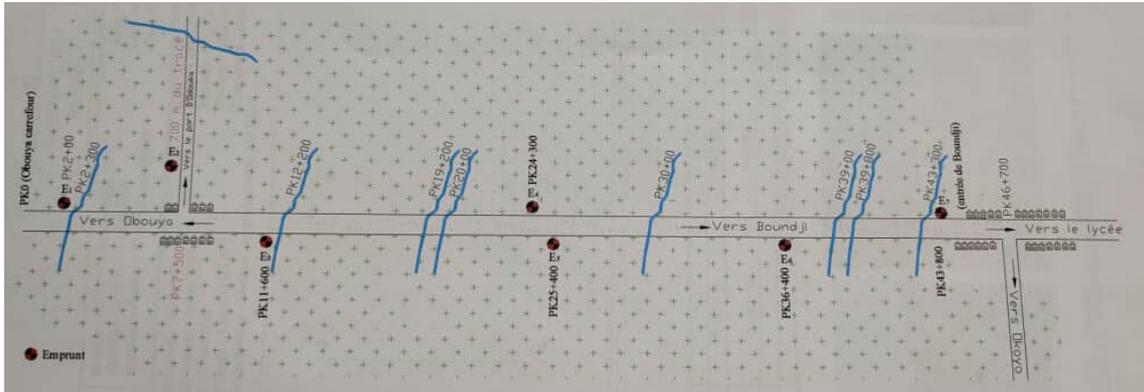
La construction et l'entretien d'infrastructure routière sont un défi pour tout Maître d'ouvrage soucieux de contribuer au développement économique et social durable d'un pays. Le sol est le principal matériau local utilisé en construction routière après une étude géotechnique préalable des gisements identifiés. Le choix de matériaux "sols" pour la structure de chaussée repose sur l'analyse des propriétés des échantillons de matériaux suivant les normes [1-2]. Ces études de matériaux mobilisent des ressources humaines et financières importantes qui ont un impact sur le coût global du projet. Les contraintes budgétaires et les coûts élevés pour la recherche des gisements de matériaux d'une part, et d'autre part, les lacunes de compréhension des normes, peuvent freiner la réalisation des projets routiers dans certains contextes (cas du Congo). De plus, lors de la réhabilitation ou la réparation d'une route existante, l'étude géotechnique des gisements de matériaux locaux est toujours exigée. Dans un contexte de développement et d'entretien continus du réseau routier, avec des délais d'exécution courts, il est essentiel de disposer de la connaissance utile sur les propriétés des matériaux dans les gisements disponibles. Alors que la gestion des infrastructures et de parc d'ouvrages de génie civil est souvent compliquée d'une part par la perte des données d'études (rapports), et d'autre part par les grands volumes de données disparates (format, moyen de stockage) [3]. La formalisation et la fusion des connaissances d'un domaine tel que l'ingénierie des matériaux routiers sont une voie intéressante pour la sélection intelligente des matériaux appropriés. Cette approche de l'intelligence artificielle appliquée en génie civil doit ouvrir à divers avantages pour l'ingénieur de l'étude ou de contrôle : a) un apprentissage automatique basé sur l'inférence des règles expertes, b) une meilleure compréhension des exigences de satisfaction de sécurité et de durabilité

des structures de chaussée, c) la réduction des incertitudes liées aux erreurs de sélection de matériaux, d) meilleure exploitation des gisements de matériaux locaux. L'objectif principal de ce travail est de présenter les prémices d'un cadre conceptuel d'aide à la sélection intelligente des sols routiers à l'aide de la formalisation et l'unification graphique des connaissances [4]. On s'intéresse à une démarche systémique mettant en évidence une description logique des informations du terrain et de laboratoire pour l'unification des connaissances sur les sols routiers.

### 1. Identification des gisements de sols

La recherche des emprunts de matériaux meubles vise à identifier par la réalisation des sondages et des essais nécessaires à l'étude des sols ou granulats disponibles. Généralement, les sondages sont exécutés sous forme de puits manuels et de forages à la tarière manuelle à des profondeurs variables, ce qui permet d'avoir des informations sur la nature des couches de sol traversées [1]. Dans le cas de l'étude de matériaux pour la construction du tronçon de la route Obouya-Boundji, 10 emprunts de matériaux ont été localisés tous les 5Km (Fig.1). L'exploitation de ces emprunts situés dans un périmètre très rapproché du tracé de la route offre un avantage économique significatif par rapport aux distances de transport de matériaux. Dans chaque emprunt identifié, quatre sondages, dont deux à travers deux tarières et de deux puits manuelles ont été réalisés à des profondeurs de 2,50m à 6,50m. Après analyse sur les échantillons testés au laboratoire, sept emprunts sur les dix ont été retenus (Fig.1). Ces tests ont permis de confirmer que le sol dans ces gisements est du sable limoneux jaune comme montré sur la coupe lithologique. Pour une meilleure exploitation des gisements, la quantité de sols exploitable dans chaque emprunt a été déterminée à partir d'une équation mathématique, qui intègre les différents coefficients de terrassement de sols (coefficients de

foisonnement = 1,20; de tassement = 0,80; et de rendement = 0,85).



**Figure 1.** Linéaire de localisation des emprunts de sols, route Obouya-Boundji.

Les échantillons de matériaux prélevés dans chaque emprunt ont été testés au laboratoire BCBTP à Brazzaville (Bureau de Contrôle du Bâtiment et Travaux Publics), pour déterminer leurs propriétés. La caractérisation géotechnique sur les échantillons de sols à effectuer à partir des essais de laboratoire (Teneur en

eau, Analyse granulométrique, Limites d'Atterberg, Equivalent de sable, Proctor, CBR, etc.) et par rapport aux normes en vigueur [5-6]. Le tableau 1 présente un extrait de résultat obtenu (emprunt 2, Pk2+00 ; emprunt 6, Pk 25+400).

**Tableau 1.** Extrait de classification des sols

| Emprunt | Propriétés de sol |  |                    |                 | Classification |     |       |
|---------|-------------------|--|--------------------|-----------------|----------------|-----|-------|
|         | P % (<80 $\mu$ m) | $\gamma_{d_{max}}$ (kg/cm <sup>3</sup> ) | $\omega_{opt}$ (%) | I CBR (95%OP M) | HRB            | RTR | LCPC  |
| E2      | 19                | 20,1                                     | 7,80               | 32              | A-2-4          | B5  | S.L.J |
| E6      | 16                | 20,3                                     | 6,84               | 36              | A-2-4          | B5  | S.L.J |

Du tableau 2, les sols des emprunts E2 et E6 ont un pourcentage de passants au tamis de 0.075 mm, supérieur à 35%. Ces sols sont de la classe des argiles sableuses, limoneuses jaunes d'après les 3 types de classification appliqués. La section présente la méthode de formalisation graphique des connaissances géotechniques sous forme de graphe unifié pour permettre une meilleure description de la formation granulaire de sol.

## 2. Méthodologie pour la formalisation graphique des connaissances

Les graphes conceptuels (CGs) sont un formalisme de représentation de connaissances qui permet de réaliser des raisonnements basés sur des règles expertes et un graphe de base du domaine [7]. Ils s'appuient sur un ensemble de graphes ordonnés de connaissance du domaine pour décrire et exprimer les faits spécifiques. La connaissance du domaine est formalisée sous des concepts et des relations à travers des graphes labélisés (modèle de connaissance). Un concept représente un

terme ou une classe d'objets (par exemple, Matériau) avec ses attributs (par exemple, indice de plasticité de sol). Une relation représente un lien qui unit des concepts entre eux dans le graphe de faits (modèle de connaissance). Un modèle de connaissance structuré sous forme de fait est exploité au moyen des règles par des inférences logiques. Une règle est un raisonnement d'expert exprimé sous forme d'hypothèse-conclusion, Si (hypothèse), alors (conclusion) ; et permet de générer de

nouvelle connaissance (inférences sur des graphes-faits cibles) [8]. Pour la formalisation à l'aide des graphes conceptuels appliquée à la caractérisation géotechnique des sols, la méthodologie adoptée est présentée à la figure 2. Elle comporte 4 étapes essentielles.

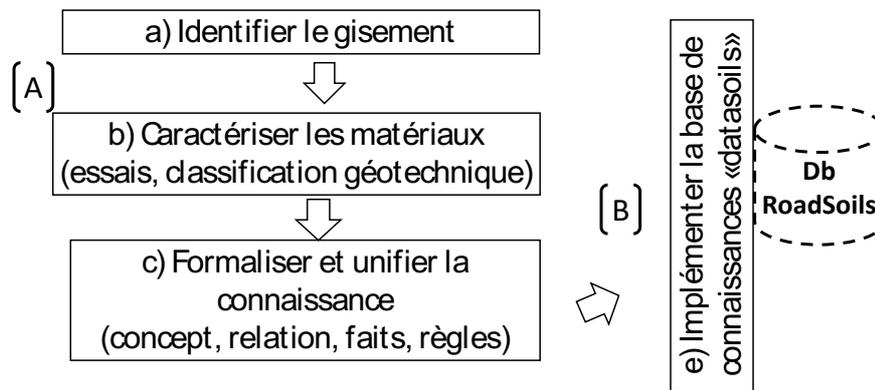


Figure2. Méthodologie pour la formalisation des connaissances suivant la méthode de graphes conceptuels.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1 Modèle de connaissance géotechnique des sols d'emprunt

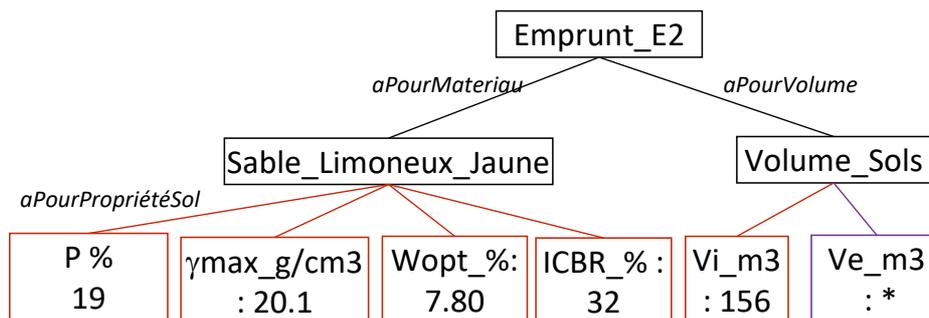


Figure 3. Graphe de fait spécifique, connaissances formalisées de l'emprunt 2, pk2+00

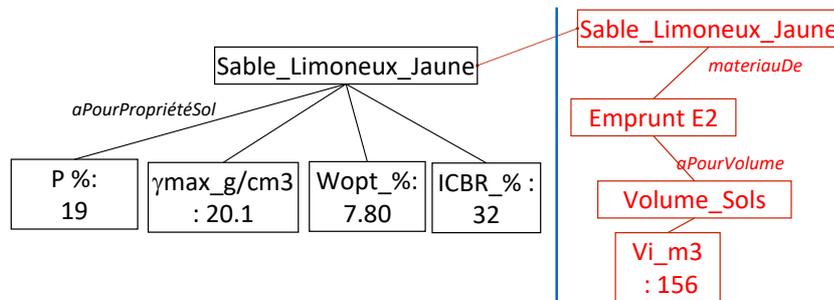
De la Figure 3 est formalisé un graphe de fait regroupant l'ensemble de connaissances qui décrit un gisement de sol pour usage en construction routière. Le graphe de fait de l'emprunt est modélisé par 3 concepts spécifiques de base (nom de l'emprunt, nature du matériau, volume des

matériaux). Chaque concept est décrit par des propriétés quantitatives et mesurables ; matériau (sable limoneux jaune) est décrit par le pourcentage de fines passant au tamis  $0,80\mu m$  (19%), densité sèche maximale de l'optimum Proctor modifié  $\gamma_{dmax}$  (20,1g/cm<sup>3</sup>), teneur en eau optimale  $\omega_{opt}$

(7,80%), indice portant CBR après immersion ICBR (32%) et volume initial des sols  $V_i$ (156 m<sup>3</sup>). Afin d'interpréter et d'exploiter le graphe de fait (Fig.3), des

règles expertes sont construites pour permettre l'inférence de la connaissance d'une partie de graphe à une autre.

### 3.2 Règles expertes pour l'identification automatique de gisement de sols

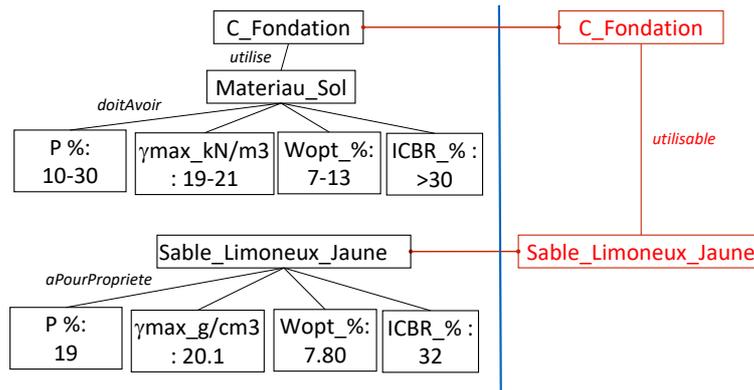


**Figure 4.** Graphe, règle experte pour l'exploitation du graphe de fait de la figure 3.

De la Figure 4, sont formalisées, à gauche les connaissances intrinsèques de sol de l'emprunt E2 (hypothèse vraie) et à droite la connaissance déduite de l'hypothèse (quantité de sols dans l'emprunt E2). Ainsi, l'inférence de cette règle à travers le graphe de fait (Fig.3) donne son explication pratique des propriétés techniques de l'emprunt E2.

Les deux illustrations de résultats de modélisation graphique formalisée (Fig.3 ; 4) peuvent justifier l'intérêt de la méthode des graphes conceptuels dans la gestion et l'exploitation de la connaissance géotechnique des matériaux, notamment de construction routière. L'extrait de graphe de fait présenté (Fig.3) est un modèle en cours de construction. Un travail important consiste à construire une base de connaissances suffisamment solide pour être en mesure de représenter une grande diversité des connaissances géotechniques

des sols d'emprunts, et de pouvoir faire des inférences (i.e. suffisamment de règles apprises à partir de la base de faits). Réaliser une telle base pour l'ensemble des régions du Congo serait très fastidieux tant le domaine de construction routière est riche et varié. Pour cela, dans cet article on s'est limité à des illustrations plus simplifiées de l'application de la modélisation basée sur les graphes conceptuels. La Figure 5 montre de quelle manière faire une sélection logique de sol pour la couche de fondation d'une route. La règle construite repose sur les exigences des normes pour les matériaux de couche de fondation [1-2], en les comparant avec les propriétés obtenues des sols testés au laboratoire. Suite à l'inférence de cette règle (Fig.5), il s'avère que les sols de l'emprunt E2 sont acceptables en couche de fondation de la chaussée.



**Figure 5.** Graphe, règle pour la sélection de sol de couche de fondation

Le modèle actuel, est déterministe et basé pour les inférences sur la logique du premier ordre, il n'est pas possible de donner une vraisemblance aux différentes hypothèses : soit l'utilisateur choisit l'hypothèse la plus probable, soit il renseigne les différents faits possibles. Cela pourrait donner lieu à une amélioration du modèle et à un traitement par des modèles probabilistes (réseaux bayésiens...).

#### 4. Conclusion

L'objectif de cet article était de montrer la possibilité d'utiliser les graphes conceptuels pour la modélisation et l'exploitation des connaissances géotechniques des sols en construction routière. Les connaissances mises en forme (formalisation) ont permis de construire le modèle de fait sur les propriétés des sols et des emprunts le long de la route Obouya-Boundji-Okoyo. L'inférence des règles formalisées a permis d'illustrer l'exploitation du modèle sur la sélection logique des matériaux. Ce travail a mis en évidence deux avantages particuliers du formalisme de graphes conceptuels en génie civil, qui sont de fournir : (a) une représentation graphique qui est utilisée à la fois pour construire la base de connaissances (modèle de connaissance) et pour l'exploiter, et (b) un cadre de raisonnement explicite sur la base des inférences de règles expertes pour interroger et gérer les bases de connaissances (support de vocabulaire, base

de faits spécifiques). En raison de la diversité des gisements identifiés ou à rechercher, ce travail doit se poursuivre par le développement approfondi de la base de connaissances géotechniques des sols pour la construction routière au Congo. L'enjeu final étant de réduire les coûts liés à la recherche des matériaux de construction.

#### Références

- [1] Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, 155p, 1980
- [2] Guide des Terrassements Routiers, SETRA-LCPC, 1992
- [3] Ndinga Okina S., Taillandier F., Breyse D., Baudrit C., Ahouet I. Modeling of alteration process in bridges: application at local context of Congo, *RAMRcS*, Vol.2 (1),pp.32-41, 2020.
- [4] Chein M., Mugnier M.L. Graph-based knowledge Representation and Reasoning. *Computational Foundations of Conceptual Graphs*. Springer, *Advanced Information and Knowledge Processing Series* (London), 2009
- [5] NF P94-051. Soils: Reconnaissance and testing. Determination of Atterberg limits; Limit of liquidity at coupelle – Limit of plasticity at Rouleau, Marth 1993

[6] NF P94-056. Soil: investigation and testing – Granulometric analysis. Dry sieving method after washing, Marth 1996.

[7] Sowa J.F. Conceptual Structures: Information Proc. in Mind and Machine. Addison–Wesley, 1984

[8] Boissier D., Henry E., Boulémia C.  
Help with building foundation design: expertise model. *French Journal of Civil Engineering*, Vol.3, No.5, 1999.