
L'évolution de l'occupation du sol et des inégalités environnementales dans la ville minière de Métlaoui par le biais d'un SIG-AMC

Bilel Salhi¹, Mohsen Dhieb^{2,3}, Yamna Djellouli⁴

1. Faculté des Lettres et des Arts, Université de Hail, Arabie Saoudite.
PO Box 2440, 81451 Hail, Arabie Saoudite
bilel_salhi@hotmail.com

2. Laboratoire SYFACTE, Équipe GEOMAGE, université de Sfax, Tunisie FLSH
de Sfax, PO Box 1168, Sfax 3000, Tunisie

3. Département de Géographie et SIG, Université du roi Abdulaziz (KAU)
PO Box 80202, Jeddah 21589, Arabie Saoudite
mohsendhie2003@yahoo.fr

4. Labo ESO, Le Mans Université, av. Olivier Messiaen,
72085 Le Mans, France
yamna.djellouli@univ-lemans.fr

RÉSUMÉ. La ville de Métlaoui constitue le noyau urbain central du bassin minier de Gafsa (BMG) au sud-ouest de la Tunisie. À l'instar des autres villes du bassin, Métlaoui est traditionnellement caractérisée par la mono-activité industrielle d'enrichissement de phosphate ; elle observe par ailleurs une dichotomie spatiale entre « le village européen » relativement favorisé qui constitue le cœur de la ville et les cités périphériques ouvrières très déshéritées. Cette dichotomie ne semble pas faiblir aujourd'hui ; bien au contraire, la recherche montre aujourd'hui les prémices d'une accentuation des ségrégations socio-spatiales héritées de la période coloniale et postcoloniale, les vicissitudes environnementales accumulées confirmant ces prédispositions d'iniquité territoriale. La méthodologie de travail a utilisé, côté socio-spatial une documentation hétérogène et open source : photos aériennes et images Landsat multitudes (1952, 1976, 1991 et 2019) et du PAU (1978, 1992 et 2008) et des recensements, analyses diachroniques de l'occupation du sol, durant les dernières décades. Côté environnemental, nous avons procédé à des analyses chimiques effectuées sur la composition du sol urbain des différentes entités spatiales de Métlaoui choisies judicieusement, notamment en termes de contenance de métaux lourds et évaluation des risques encourus par ces entités en termes de distances aux principales sources de pollution et de gravité réelle selon les standards internationaux et leur distance par rapport aux différentes unités urbaines. Les objectifs de la recherche sont donc d'examiner l'occupation du sol urbain et son évolution récente par le biais d'un SIG-minier, d'une part ; d'étudier ensuite par le biais d'une analyse multicritères (AMC) utilisant la méthode « ordered weighted average » (OWA) certains aspects de la question environnementale, d'autre part.

Le tout est intégré dans un SIG-AMC. Les résultats cartographiés à partir du SIG et de l'AMC fournissent un diagnostic territorialisé sur les inégalités territoriales et sur les risques sévères encourus par la ville. Les produits cartographiques peuvent aider les décideurs à prendre des solutions viables en termes de protection et remédier aux dangers encourus.

ABSTRACT. *The city of Métlaoui is the most important urban core in Gafsa Mining Basin (BMG) in southwestern Tunisia. Like other BMG cities, it is characterized by a single industrial activity of phosphate enrichment and observes a spatial activity between the "European village" favored to a certain term and the peripheral cities disadvantaged. Today, this dichotomy is not decreasing; on the contrary, the research reveals real signs of accentuation of this socio-spatial segregation inherited from colonial and post-colonial periods, and the environmental vicissitudes confirm the territorial iniquity. The research methodology has used for the social-spatial aspect heterogeneous data sources and open source: aerial photographs and satellite images (1952, 1976, 1991 and 2019), PAU data (1978, 1992 and 2008), census statistics, diachronic analysis of land use during the last decades. For the environment aspect, we proceeded to environmental and chemical analysis, measures on urban soil composition of various entities of Metlaoui, evaluation of potential risks in terms of distances of inhabited areas to pollution sources unequally with references to international standards. The main goals of this paper are to analyze the urban land-use evolution and mostly its recent evolution by using a GIS-mining first; to examine by a multi-criteria analysis (MCA) using the Ordered Weighed Average (OWA) some issues of the environment. All aspects are integrated in a GIS-MCA. The results of this GIS-MCA were mapped; they establish a territorialized iniquity and a diagnosis of the serious risks that may affect the city. The cartographic outputs may give useful insights to deciders to choose valuable solutions to manage or protect the city from real urban risks.*

MOTS-CLÉS : *Métlaoui, occupation du sol, évolution spatiale, cartographie, ségrégation sociale, iniquité environnementale, SIG-minier, AMC.*

KEYWORDS: *Métlaoui, land use, spatial evolution, cartography, social segregation, environmental iniquity, mining GIS, MCA.*

DOI: 10.3166/rig.2020.00094 © 2019 Lavoisier

1. Introduction

Du temps de la colonisation (1881-1956), le bassin minier de Gafsa (ou BMG) était déjà un espace ségrégatif à base ethnique d'abord, socio-économique ensuite (Belhedi, 2012). Le modèle général de l'organisation spatiale des centres miniers était un modèle dualiste opposant un centre moderne autour d'un centre historique. Métlaoui (ou Thelja, du nom de la première mine installée dans le BMG), a été déclarée officiellement « commune », c'est-à-dire ville, le 11 septembre 1908. La direction générale des exploitations minières s'y était installée et son périmètre communal a été élargi par un décret datant du 25 mai 1978. Aujourd'hui, à l'échelle du gouvernorat, Métlaoui occupe la deuxième place dans la hiérarchie urbaine après Gafsa, chef-lieu du gouvernorat avec 39 044 habitants en 2018 selon les statistiques officielles (INS, 2019).

Le but de ce travail est l'analyse de la situation de l'occupation du sol, de son évolution ainsi que de l'état de la pollution des différentes entités de la ville et ce par la combinaison de deux outils : un « SIG-Minier » à partir de sources hétérogènes et *open*

source, et une AMC basée sur les distances de ces entités par rapport aux différents risques encourus à partir des principales sources de pollution. L'emplacement des infrastructures minières en plein centre-ville a affecté, mais de manière très inégale, non seulement l'aspect esthétique et l'harmonie de la ville mais surtout la ségrégation socio-spatiale de la ville.

La combinaison des SIG et de l'AMC n'est pas fortuite. D'une part, il est bien connu que les outils SIG sont la référence en matière de traitement et d'analyse de l'information à référence spatiale comme le montrent (Rikalovic *et al.*, 2014). D'autre part, les logiciels et outils de l'AMC ont fait leurs preuves dans la résolution de problèmes d'ordre décisionnel (Laaribi, 2000 ; Malczewski, 2006). Cependant, ces outils ne possèdent pas de composantes spatiales à la manière des SIG entièrement dédiés à cette tâche, ce qui explique les nombreuses tentatives de fusion de ces deux systèmes SIG et AMC selon des variantes différentes (Conchita et Kedowide, 2006, Bell *et al.*, 2007 ; Jiang et Eastman, 2010 ; Ozturk et Batuk, 2011 ; Greene *et al.*, 2011).

Dans ce travail, nous avons retenu le logiciel IDRISI et la méthode de pondération OWA qui possèdent des fonctionnalités pour effectuer une évaluation multicritère d'ordre spatial. La synthèse des résultats obtenus lors de ce travail de recherche est visualisée grâce à une sélection de cartes issues du SIG-AMC, en plus de graphiques et de photos illustratifs.

2. Zone d'étude et méthodologie de travail

2.1. Site, situation et contraintes naturelles

Située à une quarantaine de kilomètres au sud-ouest de la ville de Gafsa, Méthlaoui est le cœur-même du BMG puisque entourée des trois autres noyaux qui le composent : Mdhilla à l'est, Oum Laraies au nord-ouest et Rdeyef à l'ouest. La ville est située sur un terrain limité à l'est et au nord par des élévations remarquables, et à l'ouest par un glacis gypseux ; elle est traversée par l'oued Méthlaoui et ses affluents. Ces derniers traversent la ville du nord vers le sud et orientent aussi bien les rues que le tracé de la voie ferrée. C'est une série de ravins déchiquetés par les marnes et les argiles recouvertes par le gypse très fortement érodé, disséqué et impropre à l'urbanisation (figure 1).

La ville se caractérise par sa situation en bas du chaînon de Méthlaoui-Rdeyef. Le relief est collinaire et montagneux, culminant à la pointe de Kchereb, prolongée au nord par une zone montagneuse également, correspondant au domaine minier (gisements de phosphates) ; une autre zone de même type s'étend vers le sud, avec une plateforme géologique différente. La position géographique de la ville en bas du Djebel et au début des dépressions, lui confère un double rôle : l'un est rattaché aux activités minières dominantes, et l'autre aux activités agricoles, notamment l'arboriculture et occasionnellement le pâturage qui s'étendent à une certaine distance à l'ouest de la ville. Le paysage de « bad-lands » entoure la ville avec le manque remarquable de couvert végétal (figure 2).

À cette hostilité des conditions de relief s'ajoutent des conditions climatiques sévères : la région d'étude se caractérise par un climat aride supérieur à hiver frais, une

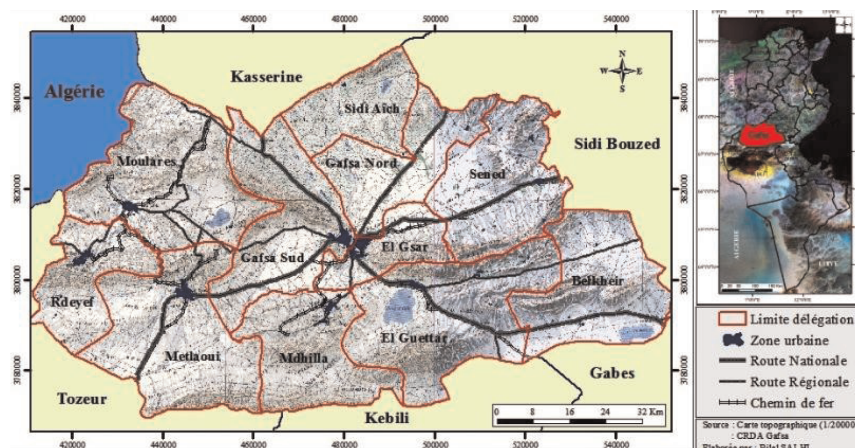


Figure 1. Présentation du gouvernorat de Gafsa et du BMG

amplitude thermique de 16 °C et une moyenne pluviométrique de 140 mm/an. Quant au nombre d'heures d'ensoleillement annuel, elles sont de l'ordre de 8,9 h/j, favorisant l'évaporation. C'est dire que l'ensemble de ces contraintes naturelles ne favorisent point *a priori* la genèse d'une ville : seule l'opportunité de l'exploitation des phosphates aux alentours l'explique, encore que les conditions de vie de ses habitants et l'occupation du sol reflètent aussi bien des inégalités territoriales qu'environnementales.

2.2. Méthodologie de travail

Pour étudier l'occupation du sol et l'évolution spatiale de la ville de Métlaoui, les auteurs ont utilisé une panoplie de sources et d'outils hétérogènes, *open source* et de terrain. Ils se sont appuyés d'abord sur des spatiocartes issues de traitement des photos aériennes multidates (1952, 1976, 1991 et 2019). En outre, les PAU (Plan d'aménagement urbain) multidates (1978, 1992 et 2008) ont été convertis puis intégrés avec les données statistiques des recensements dans le SIG pour étudier la structure de la ville, la typologie de ses habitats, un peu comme dans l'étude menée sur Fès par (Bell *et al.*, 2007). L'étude du niveau de pollution dans la ville a été basée sur une analyse multicritère (AMC) réalisée par Salhi (2017) et actualisée récemment (figure 3). Des entretiens avec les responsables des différents ministères, les analyses chimiques et les visites sur le terrain ont permis de compléter l'étude et de prendre en compte la réalité terrain et de confirmer les résultats de cette recherche.

2.2.1. L'approche multicritère

En termes d'analyse multicritère (AMC), plusieurs approches avaient été utilisées dans la littérature (Carver, 1991 ; Blaschke et Feizizadeh, 2012 ; Malczewski et Rinner,

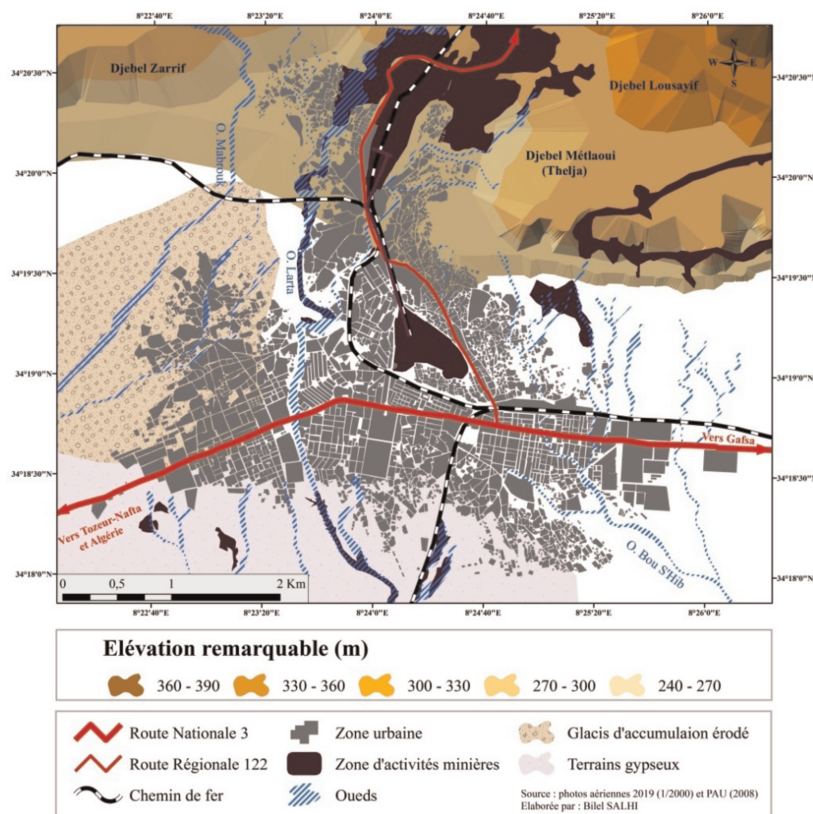


Figure 2. Présentation du site de la ville de Métaoui

2015). Des questions comme l'étude des entités défavorisées (Bell *et al.*, 2007), et l'occupation du sol, sans ou en relation avec le développement durable (Blaschke et Feizizadeh, 2012) ont été traitées. Des variantes de l'AMC ont été expérimentées : la pondération locale (Carter et Rinner, 2014), l'analyse multicritère de décision (MCDA) (Greene *et al.*, 2011), la combinaison SIG-AMC (Malczewski et Rinner, 2015), la visualisation pour la sélection de sites (Rinner et Voss, 2013). Pour le cas de l'exploitation minière et de ses impacts, plusieurs applications avaient été mises en place, des travaux académiques aussi, comme par exemple (Adidi, 1986 ; Kholladi, 2006 ; Kouadio, 2018).

La méthode AMC utilisée dans la présente recherche est la moyenne pondérée ordonnée (MPO) (ou OWA – *Ordered Weighted Average*). L'étape la plus importante dans la modélisation des données consiste à identifier les différents critères susceptibles d'être pris en considération par l'analyse multicritère (Carver, 1991 ; Chakhar, 2006). La localisation des échantillons prélevés pour l'analyse du sol que les auteurs ont pris en considération couvre les différents types de zones urbaines dégagées par l'analyse de

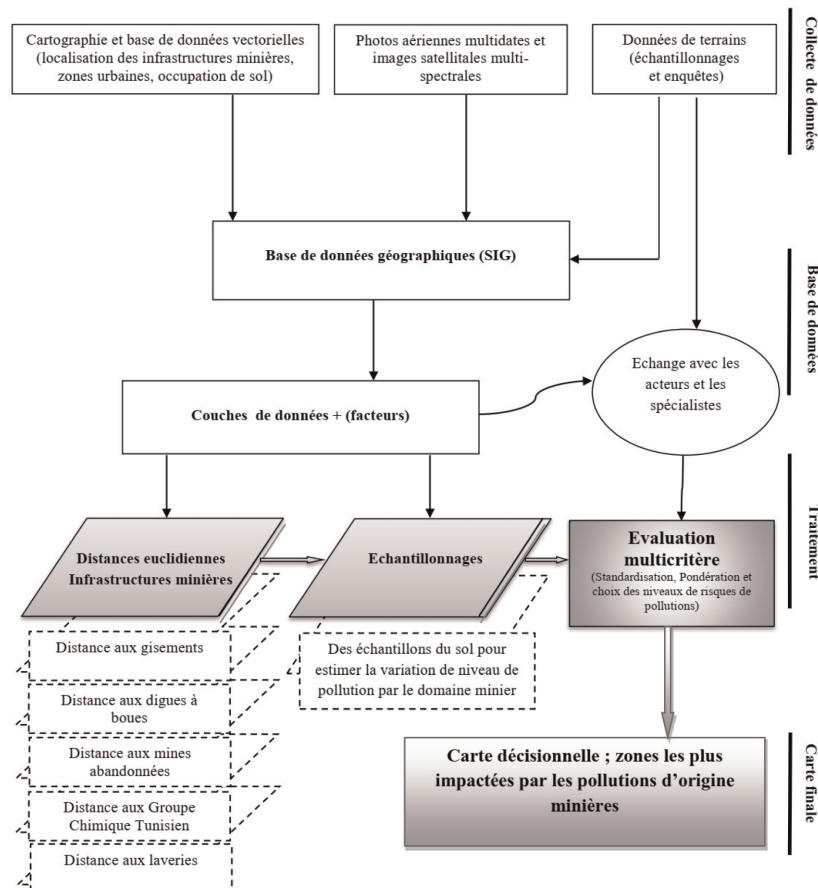


Figure 3. Approche méthodologique pour la modélisation spatiale de la variation de taux de pollution minier dans la ville de Métlaoui (conception Salhi, 2019)

l'occupation du sol. De même les risques de pollution des habitations ont été exprimés selon différents seuils de distances des habitations par rapport aux installations minières : distances aux digues à boues, au gisement, aux mines abandonnées et distance aux laveries. Deux étapes principales de l'analyse multicritère ont été réalisées sous le logiciel IDRISI : la normalisation (standardisation) des facteurs par recours à des fonctions d'appartenance de la logique floue (Fuzzy) et la détermination du seuil de risque (Malczewski, 2011) ; et la pondération des facteurs par un poids attribué à chaque couche par la méthode AHP (*Analytical Hierarchy Process, Weight Derivation*) de Saaty (1977).

La méthode AHP peut analyser la variation de niveau de pollution par les exploitations minières. D'abord, c'est un outil souple et facilement compréhensible pour

résoudre les problèmes non structurés tels que la problématique multidisciplinaire et multiacteur. Ensuite, la démarche AHP se distingue par sa façon d'établir un poids relatif à chaque critère (composantes minières : laverie, mine, zone de rejet, etc.) basé sur les analyses chimiques réalisées sur le terrain et *in situ*. L'étude avait été conduite en janvier 2019 ; les poids des facteurs ont été déterminés (ou vérifiés) à partir d'une série de comparaisons par paires de facteurs et pour produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. Ces poids peuvent ensuite être utilisés pour pondérer les facteurs dans le cadre d'une combinaison par pondération linéaire faisant appel à la fonction MCE (*Multi-Criteria Evaluation*) du logiciel IDRISI (Bensaid, 2006 ; Drobne et Lisec, 2009). Finalement, l'approche relative à la sommation des poids a permis la combinaison avec les couches SIG déjà réalisées et implémentées dans un environnement SIG permettant la modélisation cartographique des données (Bordin, 2006 ; El Garouani *et al.*, 2017).

L'analyse multicritère a été réalisée avec des rasters de distance par rapport aux infrastructures minières, permettant d'avoir une première répartition spatiale des zones à risques par la méthode OWA. Nous avons combiné des données de natures différentes, il est donc indispensable d'avoir recours à une normalisation.

2.2.2. Localisation des échantillons dans la ville de Métlaoui

L'hypothèse de travail est de montrer que les zones les plus proches de l'infrastructure minière sont les plus polluées par les rejets miniers. Pour vérifier cette hypothèse, les auteurs avaient pris 20 échantillons de sol (E1, E2, E3..., E20) à différentes distances des différentes entités urbaines de Métlaoui (figure 2). Les analyses ont porté principalement sur les métaux lourds, le fluor et le carbone organique.

Il était intéressant de combiner deux approches d'échantillonnage pour caractériser de façon optimale le site, en associant l'échantillonnage ciblé, en tenant compte des indices de contamination visuels et olfactifs, et l'approche aléatoire systématique, qui couvre adéquatement toute la ville de Métlaoui en tenant compte aussi de l'altitude, facteur pouvant opérer une variation en termes d'impact environnemental (figure 4). L'échantillonnage combiné s'avère aussi nécessaire afin de subdiviser le terrain en zones distinctes par le degré de contamination soupçonné et par le mode de dispersion des contaminants.

3. Résultats et interprétation

3.1. Genèse et structure originelle de la ville de Métlaoui

Avant de présenter les résultats de cette recherche, il est important de rappeler la genèse historique de la ville de Métlaoui, étroitement liée au développement des mines de phosphate (1886), les investissements de la Compagnie minière suivant de près l'évolution de la production marchande. L'infrastructure industrielle qui a suivi (principalement la laverie) était plus ou moins cohérente à l'origine, mais s'est dégradée

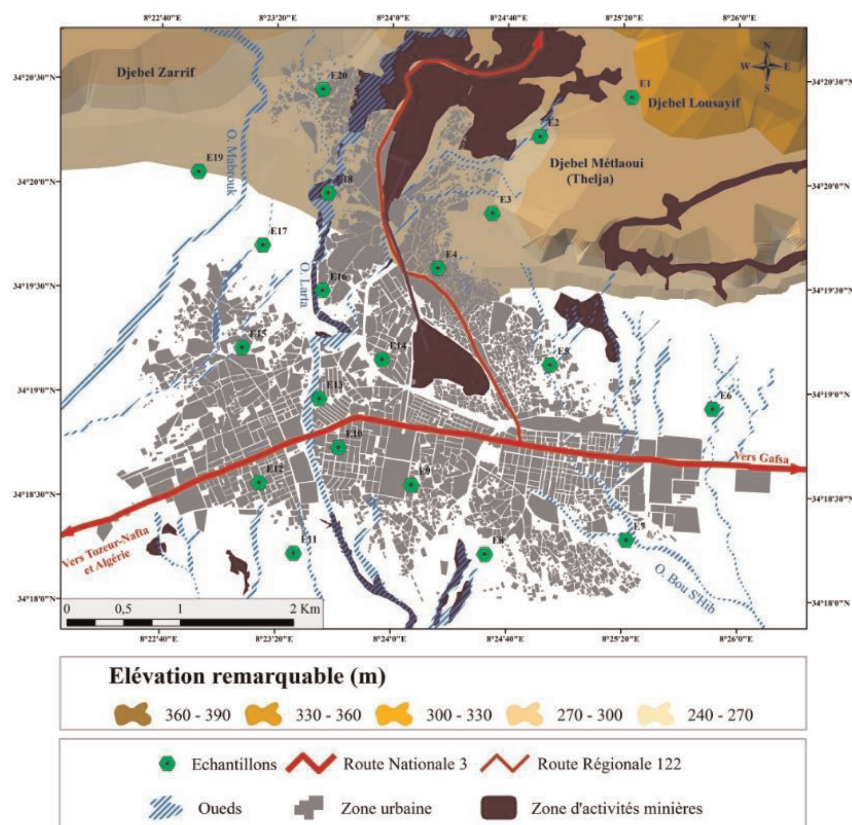


Figure 4. Localisation des échantillons dans la ville de Métlaoui

peu à peu avec l'extension des zones de stockage et de stériles à ciel ouvert. Ensuite, le « village européen » (ou village des cadres) avait été doté d'un certain nombre de services essentiels plutôt dispersés à sa périphérie : éconamat, administration minière, églises, hôpitaux (ou dispensaires), écoles, salles de fêtes, etc. Puis, des cités compactes d'ouvriers s'étaient agglutinées à l'infrastructure industrielle et aux villages des cadres, dont les équipements étaient limités au strict minimum. Enfin, des cités (ou Douars) des migrants (y compris les tribus locales, autochtones) se sont formées spontanément dans les élévations et les zones de servitudes. Toutes ces installations formaient la ville de Métlaoui dont la naissance était de nature économique et le centre pas toujours individualisé, selon le Groupe Huit (1970).

Les cités des ouvriers se sont implantées à une certaine distance de la cité européenne consacrant ainsi une disparité socio-spatiale. Les colonies ont suivi le principe de discrimination entre un espace colonisateur et un espace colonisé en utilisant des barrières naturelles comme les oueds et les collines ainsi que certains séparateurs

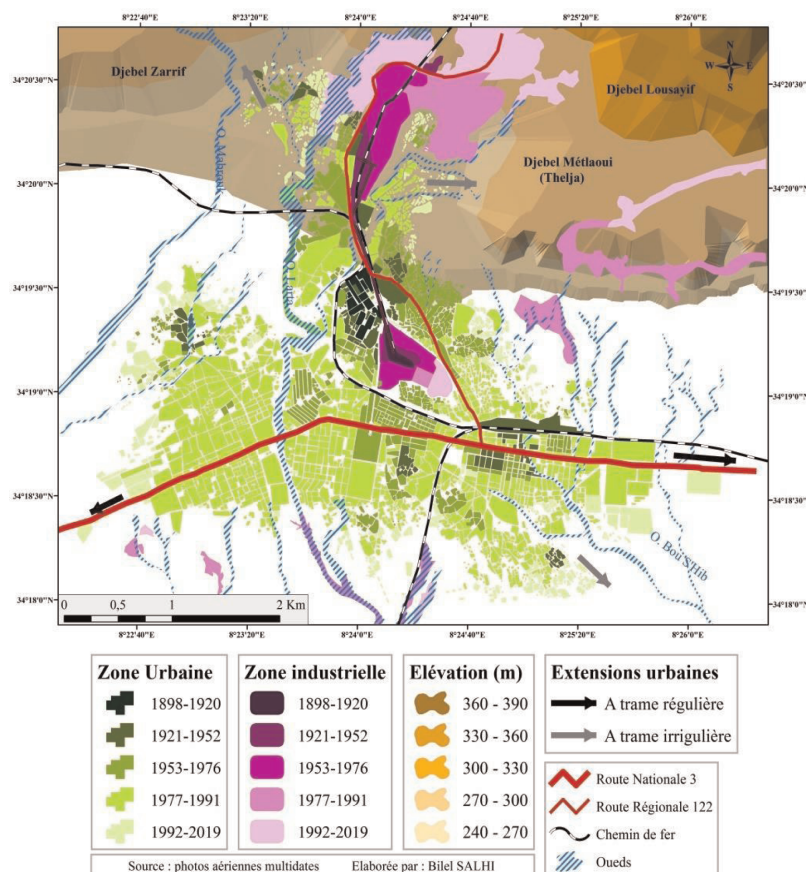


Figure 5. Genèse de la ville de Méthlaoui

anthropiques comme les rails ou la zone industrielle pour confirmer la frontière entre les deux parties d'habitat planifiées et anarchiques.

Actuellement, bien que les extensions urbaines soient insignifiantes, elles se dirigent principalement aux alentours de la RN 3, s'éloignant de l'infrastructure industrielle, dans les deux sens ; vers Gafsa principalement et vers Tozeur secondairement. En revanche, les extensions sont bloquées au nord de la ville, vu les servitudes de domaines miniers (emplacement très proche des mines abandonnées et des stocks de déchets stériles). La ségrégation socio-spatiale héritée est reproduite presque à l'identique. Aujourd'hui, la superficie urbanisable de la ville de Méthlaoui est de 464 ha, dont les zones industrielles de la CPG (Compagnie de phosphate de Gafsa) qui accaparent à elles seules 79 ha (figure 6).

Mais le développement urbain de la ville est aussi sensiblement affecté par d'autres facteurs tels que la situation foncière et l'existence de ravins et d'oueds (figure 5).

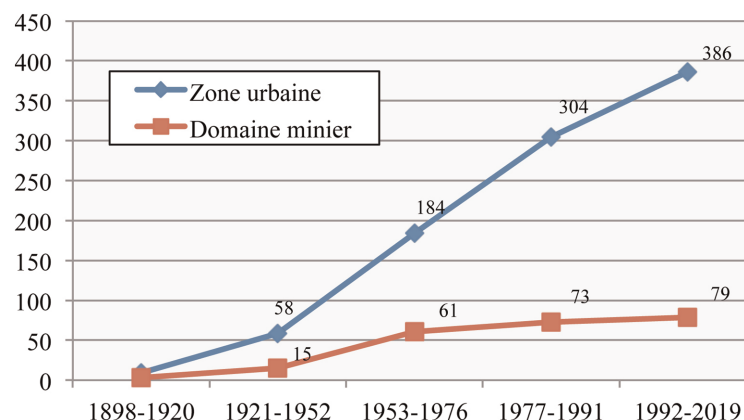


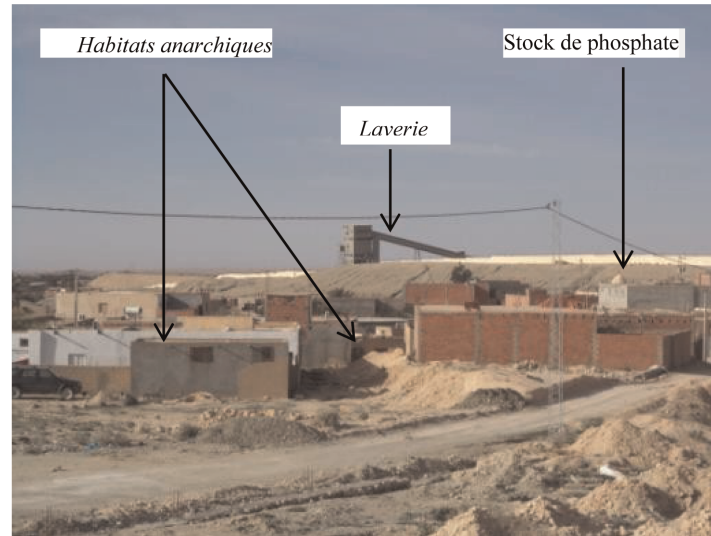
Figure 6. Évolution spatiale de la ville de Méthlaoui (en ha) (Salhi, 2019)

Les risques d'inondation sont notables lors des précipitations torrentielles (Salhi, 2017). Les zones d'extension susceptibles d'être urbanisées se répartissent dans les zones sud, aux alentours de la RN 3, et nord-ouest de la ville, caractérisées par une morphologie moyennement accidentée où on doit tenir compte des coûts d'aménagement.

3.2. Évolution urbaine de la ville

Les visites sur terrain ont permis de déduire qu'une grande partie des constructions dans la ville de Méthlaoui est édifiée sans autorisation de bâtir. C'est une urbanisation illégale dans les zones de servitudes, surtout celles juxtaposées aux domaines miniers (figure 7). Autour de la RN 3 les cités résidentielles réalisées par le CPG se sont développées en majorité avec des trames régulières, alors que la municipalité et les sociétés immobilières ont occupé l'ouest de la ville. Autour de la route régionale 122 (RR122), les activités industrielles de la CPG se sont développées principalement dans sa partie est (laveries, zone de séchage et de stockage, centrale électrique) et ses administrations dans sa partie ouest (direction d'achat, centre de géologie, centre de formation, etc.).

Le cœur de l'agglomération est paradoxalement occupé par la zone industrielle et la position de ce noyau s'est traduite par l'absence d'un centre-ville véritable et par la présence de micro-centres des cités Ennasser, Ibn Khaldoun et El Amel dans sa partie ouest (figure 8). La raison profonde de cet échec tient à l'histoire et à l'utilisation malheureuse d'un site assez judicieusement choisi au départ. La zone polyfonctionnelle, les activités tertiaires (commerces et services) et les services administratifs et de base se répartissent en fonction des trois cités qui sont : Ennasser, Ezzouhour et « Présidentielle ». Cette dernière englobe la plupart des équipements tendant à se



Servitude minière (construction juxtaposée du domaine minier)

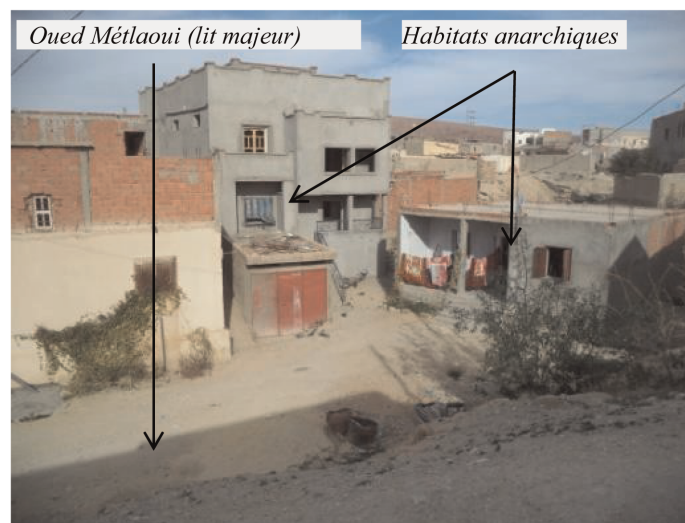


Figure 7. Prolifération des habitats dans les zones de servitude

regrouper autour de la municipalité de Méklaoui. Quant aux autres zones d'habitats anarchiques au sud-ouest de la ville, elles sont implantées pour la plupart sur des terrains gypseux, sans autorisation de bâtir et sans respect des contraintes liées à la présence de lignes électriques de haute tension.

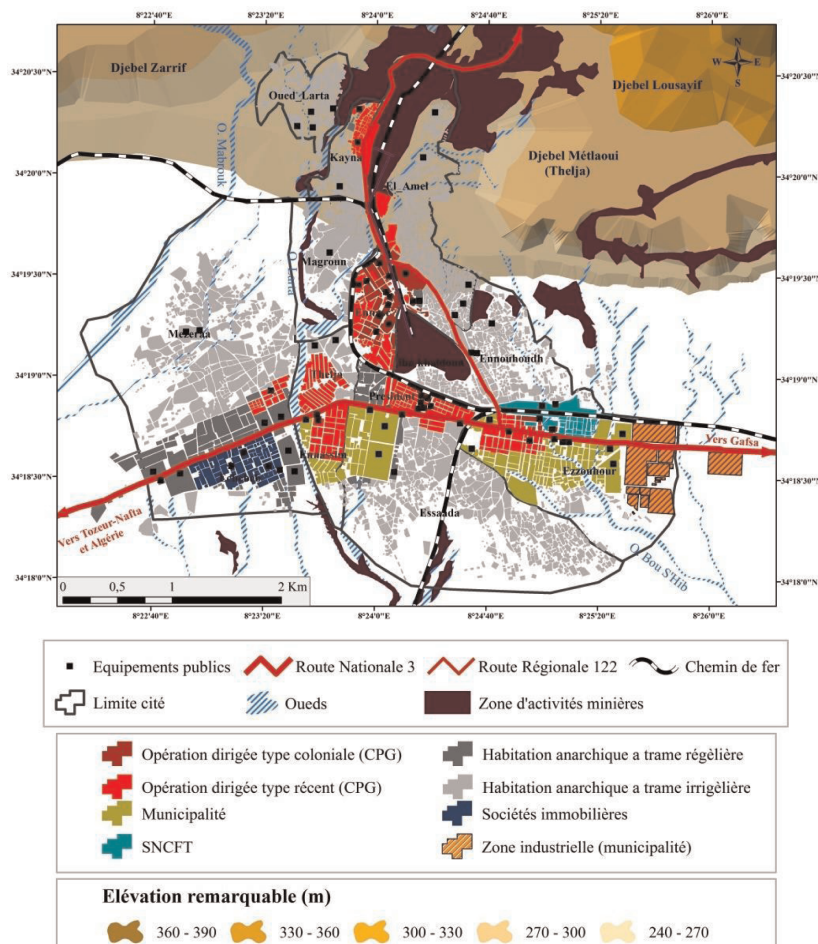


Figure 8. Armature urbaine de la ville de Mélaoui

3.3. La pollution dans la ville de Mélaoui

3.3.1. Modélisation de la pollution par l'AMC

Pour entreprendre la modélisation de la pollution par la méthode AMC, il faudrait comprendre comment ses différents éléments se sont constitués. La CPG a implanté en 1950 la première laverie dans la ville de Mélaoui. Deux ans plus tard, la deuxième laverie a été construite à 3 km de la première, au nord de la ville, près de l'aire de stockage. Les deux laveries sont reliées par un tapis de transport de phosphate, en plein centre-ville. Les terrains à proximité immédiate, situés surtout à l'ouest de celles-ci, sont occupés par des déchets de stériles (figure 10). De plus, on note l'exploitation de deux mines à ciel ouvert à environ 4 et 8 km au nord de la ville (cité Keyna et cité Oued Larta) et certains logements ont été détruits par les ondes sismiques dues aux travaux de tirs dans les mines.

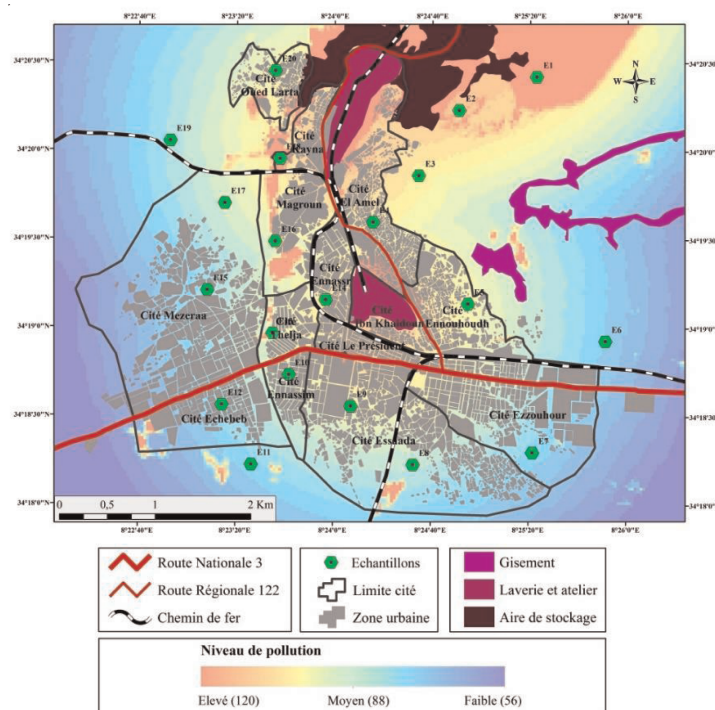


Figure 9. Variation du taux de pollution minier dans la ville de Mélaoui
(Analyse multicritère, échelle de 1 à 255)

À l'échelle de la ville de Mélaoui, la variation du taux de pollution minier diminue progressivement en allant du nord-est de la ville jusqu'au sud-ouest (figure 9). Ceci est dû à l'éloignement progressif aux mines à ciel ouvert et aux laveries. Le lit majeur de l'oued Mélaoui, couvert par les rejets miniers séchés, isole la cité Oued Larta par rapport à la ville. En période de crue, les habitats anarchiques limitrophes de l'oued sont submergés par les eaux boueuses de phosphates (Salhi *et al.*, 2014).

Le noyau impénétrable de la zone des laveries interdit quasiment les communications entre les cités Ennasr, El Amal, Souafa, et la voie ferrée souligne encore ce dispositif en dissociant les cités Magroun de la Kayéna ou Souafa d'Ibn Khaldoun. Cet éclatement correspondait à une ségrégation voulue des cités ethniques, dès l'implantation de la ville jusqu'à nos jours, favorisant ainsi la division des différentes tribus.

3.3.2. Distribution des polluants

Cette partie cartographie le niveau de toxicité par le domaine minier dans la ville de Mélaoui. Les résultats seront comparés avec les normes tunisiennes des rejets



Figure 10. Pollution issue du tapis transport de phosphate

(NT09.04)¹ pour vérifier le niveau de contamination des sols. La cartographie des analyses chimiques montre que le centre-ville et la partie nord-est de la ville sont plus pollués que la partie sud. Le lit majeur de l'oued Mélaoui (E16 et E18), zone inondable où les boues se sont accumulées par épandage pendant plus de 50 ans, constitue bien

1. Les normes tunisiennes des rejets (NT 09.04) sont similaires aux normes françaises des teneurs totales maximales en éléments traces métalliques dans les sols (Ppm sur matière sèche), selon l'arrêté du 8 janvier 1998.

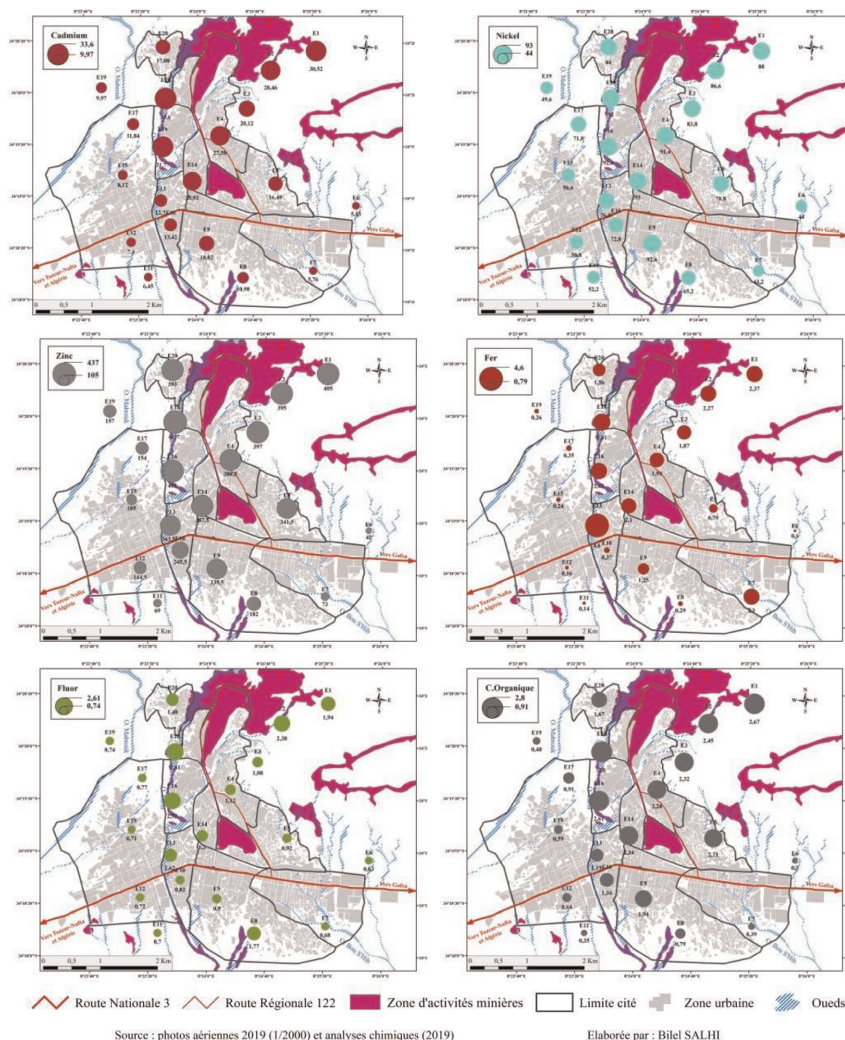


Figure 11. Distribution des polluants dans la ville de Mélaoui (en ppm)
(Salhi, 2019)

une zone contaminée. Ces polluants ne sont pas dégradables et s'accumulent dans le sol. Leur répartition est étroitement liée au pourcentage de la fraction fine et en particulier celle de la fraction argileuse issue exclusivement des effluents miniers (Salhi, 2017). La fraction argileuse concentre ces métaux lourds et joue le rôle de barrière contre leur migration. Elle provoque aussi le colmatage du lit de l'oued Mélaoui qui favorise l'écoulement des rejets industriels sur de grandes distances (Lerat, 1973 ; Artignan et Cottard, 2003) vers les habitats limitrophes des deux rives de l'oued (figure 11).

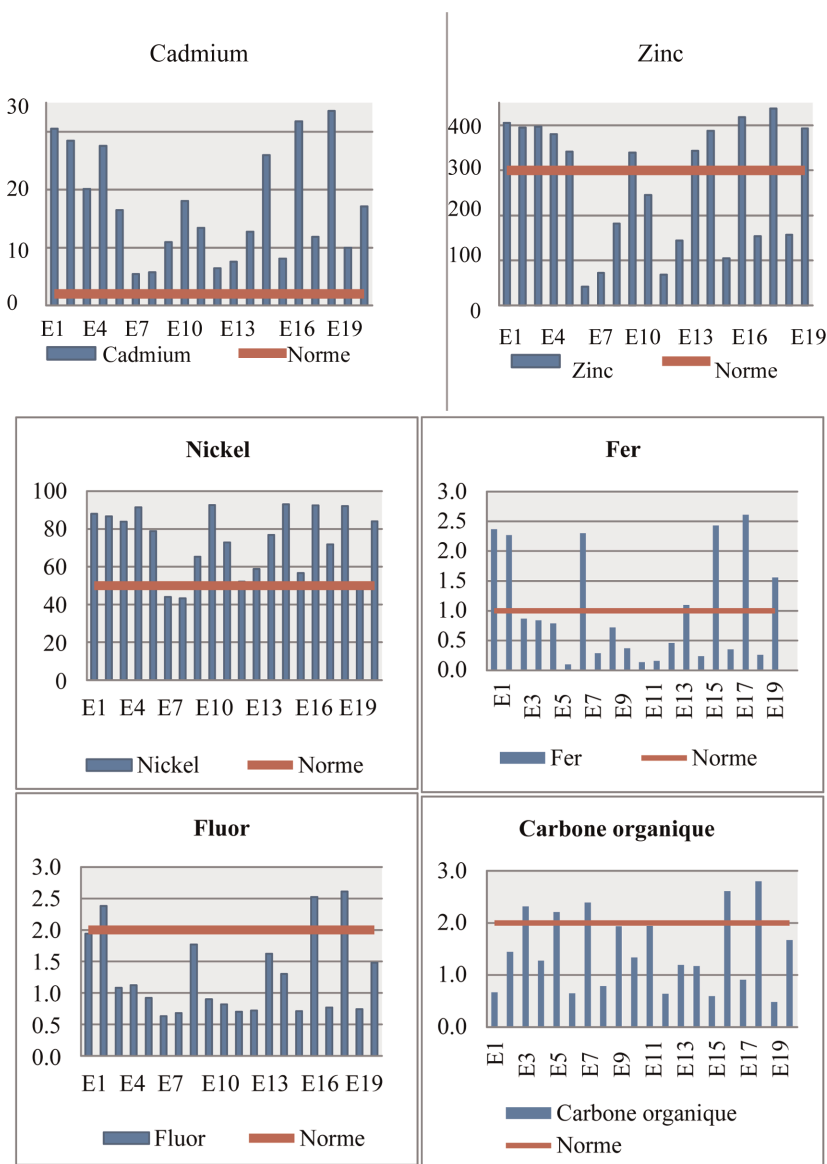


Figure 12. Comparaison des sols pollués par les exploitations minières (en ppm) avec les normes tunisiennes (NT 09.04) dans la ville de Mélaoui (Salhi, 2019)

La comparaison des résultats des analyses chimiques avec les normes tunisiennes (NT. 09.04) est présentée dans la figure 12. Le degré de contamination est variable d'une cité à l'autre. Toutefois, cette contamination est principalement due au cadmium et au nickel, mais aussi au zinc et au fer. Le nickel et le zinc dépassent deux fois la norme

tandis que le cadmium dépasse une vingtaine de fois la norme. Le carbone organique et le fluor sont aussi considérés comme des sources de contamination conséquente dans la ville. Les éléments de cette analyse montrent une inégalité environnementale aux dépens des cités ouvrières du nord de Métlaoui et une ségrégation socio-spatiale au sud de la ville.

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons tenté d'abord de diagnostiquer l'occupation du sol urbain et son évolution récente dans la ville minière de Métlaoui. Les ségrégations socio-spatiales dégagées se sont affirmées et même accentuées créant dans la ville des entités opposées. Les résultats des divers traitements des multiples sources utilisées ont abouti à l'établissement d'un SIG-minier. Il a fallu aussi tenir compte des impacts de la pollution produite par les installations minières installées au cœur de la ville. Pour cela, nous avons utilisé la variante OWA de l'AMC pour opérer un maillage au sein de la ville à partir des distances des sources de pollution. Il s'est avéré que les quartiers déshérités sont les plus touchés, accentuant la ségrégation territoriale de départ. Les teneurs en métaux lourds à la surface des sols (cadmium, nickel, fer) sont élevées et dépassent quelquefois les normes de rejet. Elles posent un grave problème de toxicité dans la ville et de santé pour les habitants.

Il reste aux décideurs de prendre en compte cet ensemble de conclusions pour revoir la planification urbaine, améliorer l'infrastructure, éliminer ou délocaliser les sources de pollution constituant une menace certaine pour la population. Cette étude peut être étendue aux autres villes minières, notamment Mdhilla, en affinant la méthodologie adoptée et notamment en testant d'autres variantes de la méthode AMC, et en intégrant d'autres facteurs tels que la situation foncière, les risques sociaux et les risques d'inondations. Alors que de graves problèmes socio-économiques affectent les villes minières du BMG, dus en partie à des revendications sociales post-révolutionnaires, il est temps de repenser le problème du cadre de vie de la ville et de ses habitants sans que l'enjeu économique du phosphate pour le pays et la région soit remis en cause. Les outils de la géomatique y jouent un rôle de premier plan, à condition qu'ils soient utilisés et expérimentés à bon escient.

Bibliographie

- Adidi A. (1986). Espace minier et formes de croissance urbaine dans le bassin phosphatier de Khouribga. Thèse en Géographie, Université Jean Moulin Lyon III.
- Artignan D., Cottard F. (2003). Éléments à prendre en compte pour l'évolution des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un plan de prévention des risques miniers (PPRM). Rapport BRGM/RP-52049-FR, avril 2003. <https://docplayer.fr/33220752-Elements-a-prendre-en-compte-pour-l-evaluation-des-impacts-environnementaux-dans-l-elaboration-d-un-plan-de-prevention-des-risques-miniers-pprm.html>

- Belhedi A. (2012). Problématique du développement régional dans le bassin minier de Gafsa, <https://amorbelhedi.wordpress.com/2012/07/16/120/>
- Bell N., Schuurman N., Hayes M. V. (2007). Using GIS-Based Methods of Multicriteria Analysis to Construct Socio-economic Deprivation Indices. *International Journal of Health Geographics*, vol. 6, n° 17. Medline:17502000. <http://dx.doi.org/10.1186/1476-072X-6-17>
- Bensaid A. (2006). SIG et Télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride: le cas de la Wilaya de Naâma (Algérie). Thèse de Géographie, Université Joseph Fourier-Grenoble 1.
- Blaschke B., Feizizadeh T. (2012). GIS-Multicriteria Decision Analysis for Landslide Susceptibility Mapping: Comparing Three Methods for the Urmia Lake Basin, Iran. *Natural Hazards*, vol. 65, n° 3, p. 2105-2128.
- Bordin P. (2006). Méthode d'observation multi-niveaux pour le suivi de phénomènes géographiques avec un SIG. Thèse en sciences de l'information géographique, l'université de Marne-La-Vallée.
- Carter B., Rinner C. (2014). Locally Weighted Linear Combination in a Vector Geographic Information System. *Journal of Geographical Systems*, vol. 16, n° 3, p. 343-361 <http://dx.doi.org/10.1007/s10109-013-0194-3>
- Carver S.J. (1991). Integrating Multi-criteria Evaluation with Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 5, n° 3, p. 321-339 <http://dx.doi.org/10.1080/02693799108927858>
- Chakhar S. (2006). Cartographie décisionnelle multicritère: formalisation et implémentation informatique. Thèse en informatique, Université Dauphine Paris.
- Conchita M., Kedowide G. (2006). SIG et analyse multicritère pour l'aide à la décision en agriculture urbaine dans les pays en développement, cas de Ouagadougou au Burkina Faso. Thèse en aménagement de l'espace urbanisme, Universités Paris 8.
- Drobne S., Lisec A. (2009). Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, vol. 33, n° 4, p. 459-474.
- El Garouani A. *et al.* (2017). Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data: Case of Fez, Morocco, *International Journal of Sustainable Built Environment*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijse.2017.02.003>
- Greene R. *et al.* (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, vol. 5, n° 6, p. 412-432. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>
- Groupe Huit (1970). *La région minière de Gafsa*. Edition du Groupe Huit, Paris, document interne spécimen, avril.
- Jiang H., Eastman J.-R. (2010). *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/136588100240903>
- Kholladi M.-Kh. (2006). SIG pour le suivi et la gestion des données de la géologie minière de la région de Constantine. *Les 2^e Journées internationales sur l'information graphique (JIG'06)*, Vol.: Actes JIG'06

- Kouadio A.F.Y. (2018). Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive. Sciences de la Terre. Thèse, Université de Montpellier.
- Laaribi A. (2000). *SIG et analyse multicritère*. Éditions Hermès. 192 p.
- Lerat S. (1973). *Géographie des mines*. In Presses Universitaires de France, Paris. coll. sup « Le Géographe », no 6, janvier-mars.
- Malczewski J. (2006). *GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature*, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658810600661508>
- Malczewski J. (2011). Local Weighted Linear Combination. *Transactions in GIS*, vol. 15, n° 4, p. 439-455. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01275.x>
- Malczewski J., Rinner C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Ozturk D., Batuk F. (2011). Implementation of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis with VB IN ArcGIS. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, vol. 10, n° 6, p. 1023-1042 <http://dx.doi.org/10.1142/S0219622011004695>.
- Rikalovic A.*et al.* (2014). GIS Based Multicriteria Analysis for Industrial Site Selection. *Procedia Engineering*, vol. 69, n° 3, p. 1054-1063.
- Rinner C., Voss. S. (2013). *MCD4ArcMap-An Open-Source Multi-criteria Decision Analysis and Geovisualization Tool for ArcGIS 10*. Cartouche, Newsletter of the Canadian Cartographic Association, 86, p. 12-13
- Saaty T.L. (1977). *A scaling method for priorities in hierarchical structures*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022249677900335>
- Salhi B., Djellouli Y., Dhieb M., Messner F. (2014). Localisation des zones affectées par la pollution minière à l'aide des Systèmes d'Information Géographique couplés avec l'Analyse multicritère. Cas du bassin minier de Gafsa (Sud-Ouest de la Tunisie). *Acte du colloque Géomatique et cartographie, une vision prospective 2014*, Orléans, France.
- Salhi B. (2017). Mutations socio-spatiales et environnementales du bassin minier de Gafsa (Sud-Ouest de Tunisie) : apport des outils géomatiques. Thèse en Géographie, Université du Maine, France.