

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
KHALDI Mohammed	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Président
MOUNIER Stéphane	Université de Toulon, France	MCH	Rapporteur
BUTYLINA Svetlana	LAB Université des Sciences Appliquées, Finland	Senior Chercheur	Rapporteur
KHALIL Fouad	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	PES	Rapporteur
BAKIZ Bahcine	Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir	PES	Examineur
EL OUARDI Youssef	Lahti Université des Technologies LUT, Lappeenranta, Finland	Senior Chercheur	Examineur
OUAMMOU Abdelkrim	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse
LACHKAR Mohammed	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Invité



Résumé:

La demande croissante de solutions économiques, hautement efficaces et durables pour le traitement des eaux a stimulé les recherches sur les matériaux naturels et leurs modifications. Les effluents industriels, souvent contaminés par des ions métalliques lourds toxiques et des colorants organiques persistants, constituent un problème environnemental majeur en raison de leurs effets néfastes sur les écosystèmes et la santé humaine. Les procédés de traitement conventionnels impliquent généralement des coûts élevés, une forte consommation d'énergie ou la génération de polluants secondaires. En revanche, les zéolites apparaissent comme des matériaux très attractifs grâce à leur grande surface spécifique, leur forte capacité d'échange cationique et leurs propriétés d'adsorption sélective. Toutefois, la production commerciale des zéolites repose le plus souvent sur des procédés coûteux et énergivores faisant appel à des précurseurs chimiques purs.

Cette thèse s'intéresse au développement de voies de synthèse durables et économiques des zéolites à partir de ressources minérales locales disponibles au Maroc, notamment la bentonite et la diatomite. Ces argiles naturelles se caractérisent par leur abondance, leur faible coût et leurs teneurs élevées en silice et en alumine, ce qui en fait des précurseurs prometteurs pour la préparation des zéolites. L'étude intègre des méthodes d'activation thermique, chimique et par échange ionique, associées à des procédés hydrothermaux et de fusion alcaline, afin de transformer les argiles brutes en zéolites à haute capacité.

Une optimisation systématique des paramètres de synthèse a été réalisée dans le cadre des travaux expérimentaux, suivie d'une caractérisation approfondie des produits obtenus par DRX, FTIR, MEB et EDS. Les zéolites synthétisées ont été évaluées pour leur capacité d'adsorption vis-à-vis des ions Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} et Pb^{2+} , qui sont des contaminants courants issus des batteries lors de leur utilisation et de leur élimination, ainsi que du bleu de méthylène, utilisé comme polluant organique modèle des effluents industriels.

Les résultats ont montré que les zéolites obtenues (A, Na-P) présentent une cristallinité remarquable, une large surface spécifique et des capacités d'adsorption supérieures à celles de certaines références commerciales. Plus important encore, elles ont affiché des rendements d'élimination élevés pour le cadmium, le nickel, le plomb et le bleu de méthylène, soulignant ainsi leur fort potentiel en tant qu'adsorbants économiques et respectueux de l'environnement pour le traitement des eaux usées.

Globalement, les ressources minérales marocaines peuvent être exploitées de manière stratégique pour répondre à des enjeux environnementaux urgents tout en ouvrant des perspectives industrielles dans les domaines de l'adsorption, de la catalyse et de la dépollution environnementale.

Mots clés : Bentonite, diatomite, zéolites, synthèse hydrothermale, adsorption, élimination des métaux lourds, bleu de méthylène, traitement de l'eau



Design, Synthesis, and Performance Evaluation of Novel Zeolite Materials Derived from Natural Minerals for Advanced Wastewater Remediation Design, Synthesis, and Performance Evaluation of Novel Zeolite Materials Derived from Natural Minerals for Advanced Wastewater Remediation

Abstract:

Growing demand for economical, highly efficient, and sustainable solutions for cleaning waters has driven research on natural materials and their modifications. Industrial effluent, often contaminated with harmful heavy metal ions and persistent organic dyes, is a widespread environmental issue due to its harmful impact on ecosystems and human health. Conventional treatment processes often involve expensive costs, high-energy demands, or production of secondary pollutants. However, zeolites are very attractive materials because they have large surface area, high cation-exchange capacity, and selective adsorption abilities. However, commercial production of zeolites usually relies on expensive and high energy demanding processes involving pure chemical precursors.

This thesis investigates the problem of manufacturing sustainable and economical routes to zeolite synthesis from locally available mineral sources in Morocco, namely bentonite and diatomite. Such natural clays have abundant supplies, low prices, and high levels of silica and alumina and hence become valuable precursors to zeolite preparation. Analysis encompasses thermal, chemical, and ion-exchange activating methods coupled with hydrothermal and alkali fusion routes to transform raw clays into high-capacity zeolites.

Systematic optimization of synthetic parameters was performed in experimental research work, and subsequently broad characterization was carried out on products through XRD, FTIR, SEM, and EDS analysis. The synthesized zeolites were evaluated for their adsorption capacity towards Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} and Pb^{2+} ions, which are common battery-derived contaminants leached out during battery use and disposal, and methylene blue dye, as model organic pollutant in industrial effluent.

Results showed that the zeolites synthesized (A, Na-P) exhibited noteworthy crystallinity, wide surface area, and higher adsorption capacities compared to some commercial references. Most importantly, they achieved remarkable removal efficiencies against cadmium, nickel, lead and methylene blue, highlighting their promising use as cost-effective and environmentally friendly adsorbents in treating wastewater systems.

Overall, Moroccan mineral deposits can be strategically utilized to address urgent environmental challenges while simultaneously unlocking industrial opportunities in adsorption, catalysis, and environmental remediation.

Key Words: Bentonite, Diatomite, Zeolites, Hydrothermal synthesis, Adsorption, Heavy metal removal, Methylene blue, Water treatment.