# Revue Internationale DAMBE

**ISSN :1987-1996**

**Volume 2 – Numéro 2 - Juin 2026**

## Valorisation des Savoirs Endogènes et Promotion de la Recherche Scientifique

**Revue semestrielle multidimensionnelle du CERFDES**
**Bamako - Mali**
https://revuedambe.cerfdesconsulting.com/

CC BY

# Revue Internationale DAMBE

**Valorisation des savoirs endogènes et promotion de la recherche scientifique.**

**ISSN :1987-1996**

## PRESENTATION

Tirant son nom du mot bambara « **Dambé** », qui signifie la dignité, la revue Internationale « **Dambé** » vise à promouvoir la recherche scientifique en mettant en valeur les savoirs endogènes en Afrique et ailleurs. C'est une revue semestrielle adossée au Centre d'études, de Recherche et de Formation sur les Dynamiques Économiques, Environnementales et Sociales (CERFDES). À l'exception des numéros spéciaux dont la publication est conjoncturelle, la revue publie deux numéros par an (Juin et Décembre).

Ayant un intérêt particulier pour les sciences sociales, elle reçoit des contributions de doctrine livrant des réflexions sur toutes les questions ou problématiques actuelles dans des domaines tels que, la géographie, l'économie, le droit, la santé et tout autre sujet concernant les sciences sociales, humaines et environnementales.

Les articles soumis à la revue Dambé sont évalués de façon rigoureuse par un comité scientifique et de lecture composés de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de diverses nationalités et de spécialités variées. Tous les articles publiés restent accessibles librement par les auteurs ainsi que par les lecteurs sur le site de la revue.

## COMITE EDITORIAL

**Président du Comité Scientifique**

Pr Balla DIARRA, Professeur titulaire en Géographie, École Nationale d'Administration

**Coordinateur Scientifique**

Dr Issa DIALLO, Maître de conférences en sociologie de la santé, INFTS

**Rédacteur en Chef**

Dr Idrissa DEMBELE, Maître assistant en droit, USJPB

**Rédacteur en Chef Adjoint**

Dr Adama Koné, Géographe, CERFDES

**Coordonnateur des Rubriques Sciences de la Santé**

Dr Abdoul Salam DIARRA, Maître assistant en Santé Publique, CNRST, Bamako, Mali

**Directeur de publication**

**Dr Malick TIMBINE**, Maître assistant en Géographie, environnement et santé, ISH

## COMITE SCIENTIFIQUE

**Pr Balla DIARRA**, Géographie, Ecole Nationale d'Administration, Mali

**Pr Flatie OUATTARA**, philosophie, Université Joseph K. Zerbo, Burkina Faso

**Pr Seydou MARIKO**, Géographie, Ensup de Bamako, Mali

**Pr Cheich Hamala TOURE**, Professeur titulaire, Université des Sciences Juridiques et Politiques de Bamako (USJPB), Mali

**Pr Brema Ely DICKO**, Sociologue, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Pr Aboubacar Sidiki COULIBALY**, littérature anglaise, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Pr Belco OUOLOGUEM**, Philosophie, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Bazoumana DIARRASSOUBA**, Géographie, Maître de conférences, CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte d'Ivoire

**Dr Nouhoum TANDINA**, Maitre de Conférences CAMES, USJPB

**Dr Amadou TRAORE**, Maître de conférences CAMES en sociologie, Université de Ségou.

**Dr Fodié TANDJIGORA**, Sociologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Ibrahima TRAORE**, Sciences de l'Education, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Boureima TOURE**, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Seydou LOUA**, Sciences de l'Education, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Abdoulaye GUINDO**, Anthropologie médicale, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Kawélé TOGOLA**, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Almamy SYLLA**, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Arouna DEMBELE**, Géographie, Maître de conférences, USSGB Mali

**Dr Amadou BAMBA**, Maître de conférences en Économie, USSGB, Mali

**Dr Baba COULIBALY**, Géographie Maître de Recherche à l'ISH. Mali

**Dr Aimé Assué YAO**, Géographie, Maître de conférences CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte D'ivoire.

**Dr Tuo PEGA**, Géographie de la santé, Maître de conférences CAMES, Université Félix Houphouët Boigny.

**Dr Papa Fara DIALLO**, Maitre de conférences en sciences politiques, Université Gaston Berger de saint Louis, Sénégal

**Dr Boubacar dit Dédé TRAORE**, Archéologie, Maître de conférences à l'ISH.

**Dr N'Gna TRAORE**, anthropologie, Maître de conférences à l'ISH.

**Dr Issa DIALLO**, Maitre de conférences en sociologie de la santé, INFTS.

**Dr Souleymane KEITA**, Maître de conférences, philosophe, USLHB.

**Dr Moctar SIDIBE**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de conférences, sciences de l'éducation, USLHB.

**Dr Mory DIALLO**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Allaye NIANGALY**, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Abdoul SOGODOGO**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Oumar Toumaly DIALLO**, Maitre de conférences, USJPB

**Dr Samba SOGOBA**, Maître de Conférences, USJPB

**Dr Yamadou CAMARA**, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Ahmed SAMAKE**, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Mariam SIDIBE**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Fousseyni DOUMBIA**, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Sounko SISSOKO**, Maitre de Conférences, Université de Ségou

**Dr Lamine SANDY**, Sociologie, Maitre de recherche, INFTS, Mali

## COMITE DE LECTURE

**Dr Bazoumana DIARRASSOUBA**, Géographie, Maître de conférences, CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte d'Ivoire

**Dr Arouna DEMBELE**, Géographie, Maître de conférences, USSGB Mali

**Dr Issa DIALLO**, Maître de conférences des Universités du CAMES en sociologie de la santé, INFTS

**Dr Souleymane KEITA**, Maître de conférences, philosophe, USLHB.

**Dr Moctar SIDIBE**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de conférences, sciences de l'éducation, USLHB

**Dr Tuo PEGA**, Géographie de la santé, Maître de conférences CAMES, Université Félix Houphouët Boigny.

**Dr Ibrahima TRAORE**, Sciences de l'Éducation, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

**Dr Mory DIALLO**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Mariam SIDIBE**, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

**Dr Yacouba TENGUERI**, Maître-assistant CAMES Sociologie, Université de Dédougou, Burkina Faso.

**Dr Amadou BAMBA**, Maitre-assistant CAMES, Maître de conférences en Économie, USSGB, Mali

**Dr Yéo LANZENI**, Maître-assistant CAMES en Géographie, Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan.

**Dr Mesmer Luther GUEUYOU**, Centre d'études de droit international de l'université Paris Ouest, Enseignant chercheur à l'université de Nantes.

**Dr Solim ALEKA**, Docteur en Droit public, Ministère de la Santé du TOGO.

**Dr Hamidou NAPARE**, Sciences de l'éducation, Chargé de Recherches à l'INFSS.

**Dr Bakaye TOGOLA**, Anglais, études africaines et postcoloniales, UCAD

**Dr Issa TOGOLA**, Maître assistant en Géographie, Institut de sciences humaines, Bamako.

**Dr Soufiana Souleymane MAIGA**, didactique des langues université de touba Arabe.

**Dr Drissa TRAORE**, Maître assistant CAMES, Université de Daloa, RCI.

**Dr Tiecoura Hamed COULIBALY**, Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo.

**Dr Siaka DOUMBIA**, Maître assistant en Géographie, Université de Ségou.

**Dr Francis Birama Daba SARR**, philosophe, Université cheikh Anta Diop de Dakar.

**Dr Falingué KEITA**, Économie, USSGB.

**Dr Harouna BAGAYOKO**, Géographie, USSGB.

**Dr Adama KONÉ**, Géographie, Université de gestion et de développement durable de Bamako.

**Dr Amadou SOW**, Droit, Centre d'Etudes, de Recherche et de Prospective en Afrique – CERPA (Mali).

**Dr Ibrahima BAMBA**, Droit, Institut de pédagogie universitaire de Bamako (IPU)

**Dr Lassine DIARRA**, Maître-Assistant USJPB.

**Dr Adama KONE**, Géologie, Maître-Assistant à la FST

**Dr Issa OUATTARA**, Maître assistant en Géographie, INFTS de Bamako.

**Dr Oumar DEMBELE**, Géographie, point SUD.

**Dr Oumar KONÉ**, philosophie, USLHB.

**Dr Abdou Bougoury TRAORE**, Économie de l'environnement, USSGB.

**Dr Lassina TOGOLA**, logisticien, USSGB.

**Dr Ousmane DOUMBIA**, Marketing communication, USSGB.

**Dr Toumani KANTE**, sciences agronomiques, IER.

**Dr Youssouf GUINDO**, Géographie de l'environnement, ENSUP.

**Dr YAO Koffi Bertrand**, Maître assistant CAMES en Géographie, Université Félix Houphouet Boigny d'Abidjan.

**Dr Abdoulaye MAIGA**, Économie politique, USSGB.

**Dr Abdoul wahab Issiaka MAIGA**, Administration Éducative et planification. Université privée Attaoune (UPA), BAMAKO

**Dr Ousmane Famagan KONATE**, Droit public.

**Dr Malick TIMBINE**, Géographie, environnement et Santé, Maître-Assistant à l'ISH.

**Dr Moussa FOFANA**, anthropologie de la santé, Maître-Assistant à L'ISH.

**Dr Lala Aïché TRAORE**, Lettre Moderne, Maître- Assistant à l'ISH.

**Dr Yaya SIDIBE**, Économie, Maître Assistant à l'USSGB.

**Dr Mamoutou BERTHE**, Philosophie à l'ENSup.

**Dr Abdoulaye N'Tigui KONARE**, économiste, Maître- Assistant à l'USSGB.

**Dr Boubacar KONATE**, Maître-Assistant à l'INFTS.

**Dr Ousmane SY**, Maître de recherche, Epidémiologiste, Direction Générale de la Santé et de l'Hygiène Publique, Bamako, Mali.

**Dr Abdoul Salam Diarra**, Maître assistant en Santé Publique, CNRST, Bamako, Mali.

**Dr Idrissa DEMBELE**, droit, Maitre-Assistant, USJPB

**Dr Bengaly GUINDO**, Science politique, Maitre-Assistant USJPB

**Dr Sory Ibrahim Maiga**, Science politique, Maitre-Assistant USJPB

**Dr Mohamed BERTHE**, droit Maitre-Assistant, École supérieur de journalisme et des sciences de la communication, Bamako

**Dr Seydou MALLET**, droit, USJPB

**Dr Oumar CAMARA**, droit, Maitre-Assistant en droit USJPB

**Dr Bakary KONE**, Maitre-Assistant à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako.

**Dr Lamine Boua COULIBALY**, Géographie, Maitre-Assistant à l'Université de Ségou.

**Dr Soumaila COULIBALY**, Psychologie, Enseignant chercheur à l'université des sciences sociales et de gestion de Bamako.

**Dr Seydou Soungalo COULIBALY**, Sciences de l'éducation, à l'IPU de Bamako.

**Dr Ibrahim Amara DIALLO**, Philosophie politique et morale, ULSHB.

**Dr Ibrahim KONE**, relations internationales, FSAP, Bamako

**Dr Moïse Jean**, Docteur en droit public à l'Université de Nanterre, Chercheur postdoctoral à l'Université de Genève.

# SOMMAIRE

**Diakaridia SIDIBE, Yaya DOGONI, Bakary DAGNO**

ANALYSE DE L'EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA DENSITE, LA STRUCTURE ET LA PRODUCTION LIGNEUSE DANS LA FORET CLASSEE DES MONTS MANDINGUES AU MALI ..... 1

ANALYSIS OF THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE DENSITY, STRUCTURE AND WOOD PRODUCTION IN THE CLASSIFIED FOREST OF THE MANDINGUE MOUNTAINS IN MALI..... 1

**ADJAWOUTO Kossi Tozo, DANDONOUGBO Iléri, HETCHELI Follygan**

MAUVAIS ETAT DU RESEAU ROUTIER ET LA PRODUCTION DU SODABI (BOISSON LOCALE) DANS LES MILIEUX RURAUX DE LA PREFECTURE DU MOYEN-MONO AU TOGO ..... 13

POOR CONDITION OF THE ROAD NETWORK AND THE PRODUCTION OF SODABI (LOCAL DRINK) IN RURAL AREAS OF THE MOYEN-MONO PREFECTURE IN TOGO..... 13

**Komi DOSSE, Koudzo SOKEMAWU**

LES DÉTERMINANTS DE LA CONSOMMATION DU LAPIN D'ÉLEVAGE DANS LA DISTRICT AUTONOME DU GRAND LOMÉ AU SUD-TOGO..... 32

DETERMINANTS OF FARMED RABBIT MEAT CONSUMPTION IN THE GREATER LOMÉ AUTONOMOUS DISTRICT, SOUTHERN TOGO..... 32

**Bakary BERTHE, Boubacar SY, Abdoulaye KEITA, Houdou Attikou DIALLO, Bokary DIALLO**

ANALYSE DU PROCESSUS D'ORGANISATION ET DE GESTION DES ÉVACUATIONS SANITAIRES AUX SERVICES D'ACCUEIL DES URGENCES (SAU): CAS DU CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE (CHU) DE GABRIEL TOURE ..... 43

ANALYSIS OF THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT PROCESS OF MEDICAL EVACUATIONS IN EMERGENCY DEPARTMENTS (EDS) : CASE OF THE GABRIEL TOURE UNIVERSITY HOSPITAL CENTER (CHU) ..... 43

**Tantely Aro Tafika Notahina Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Ny Andry Nomena Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Oliva RAKOTONINDRINA, Faly Tinasoa ANDRIANANDRASANIRINA**

IMPACT DE L'USAGE DES LEARNING LABS SUR L'INNOVATION PÉDAGOGIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR : CAS DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE L'UNIVERSITÉ DE FIANARANTSOA, MADAGASCAR) ..... 58

IMPACT OF LEARNING LAB USE ON PEDAGOGICAL INNOVATION IN HIGHER EDUCATION: CASE OF THE ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE OF THE UNIVERSITY OF FIANARANTSOA, MADAGASCAR ..... 58

**KOUAKOU Amenan Ester, DAGNOGO Gnéré Laeticia Blama**

PETITES ÉPARGNES, GRANDES VICTOIRES »: POUR UNE ANALYSE COMMUNICATIONNELLE DU PROGRAMME FILETS SOCIAUX PRODUCTIFS DANS LA COMMUNE DE SOUBRÉ EN CÔTE D'IVOIRE ..... 70

SMALL SAVING, BIG VICTORIES »: A COMMUNICATION ANALYSIS OF THE PRODUCTIVE SOCIAL SAFETY NET PROGRAMM IN THE COMMUNE OF SOUBRÉ IN IVORY COAST ..... 70

**Tantely Ny Andry Nomena Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Aro Tafika Notahina Anjarasoa RAKOTONINDRINA, RATSIMBAZAFY, Tantely Oliva RAKOTONINDRINA**

MODERNITÉ, ÉDUCATION FAMILIALE ET RÉSULTATS SCOLAIRES : LE CAS DE LA RÉGION DIANA À MADAGASCAR ..... 85

MODERNITY, FAMILY EDUCATION AND ACADEMIC ACHIEVEMENT: THE CASE OF THE DIANA REGION IN MADAGASCAR ..... 85

**Djibril Abdoulaye SABANE, Boubacar SY**

EFFETS DES POLITIQUES DE SUBVENTIONS AGRICOLES SUR LA CROISSANCE ECONOMIQUE AU MALI ..... 102

EFFECTS OF AGRICULTURAL SUBSIDY POLICIES ON ECONOMIC GROWTH IN MALI ..... 102

**NGBANGA MOSALA CLAUDE**

ANALYSE DES BESOINS DU PEUPLE BUDJA À TRAVERS LE VÉCU DES PHÉNOMÈNES ‘’PSI ‘’ ..... 110

ANALYSIS OF THE NEEDS OF THE BUDJA PEOPLE THROUGH THEIR EXPERIENCE OF PSI PHENOMENA ..... 110

**TSHIKAMA KALAMBA Alfred**

ENTREPRENEURIAT CULTUREL À KINSHASA: ENJEUX ET PERSPECTIVES DE CRÉATION D'UNE INDUSTRIE CRÉATIVE (CAS DE L'ATELIER ALTSHIK. C.A.F) ..... 124

CULTURAL ENTREPRENEURSHIP IN KINSHASA: ISSUES AND PROSPECTS FOR CREATING A CREATIVE INDUSTRY (CASE OF THE ALTSHIK WORKSHOP. C.A.F) ..... 124

**IPOBA MENAKUNTIMA Léonard, LONGI MASALA Rachel, MATAND TUILWENG Alphonse, KIPALA ESANGO Nestor**

EVOLUTION DE L'HABITAT DANS L'AIRE URBAINE DE KINSHASA : ETAT DE LIEUX ET PERSPECTIVES ..... 132

HOUSING TRENDS IN THE KINSHASA URBAN AREA : CURRENT SITUATION AND OUTLOOK ..... 132

**Issoufou COULIBALY**

APPORTS DES TECHNOLOGIES INTELLIGENTES ET NUMÉRIQUES DANS L'AGRICULTURE MALIENNE ..... 145

EMERGING ECOLOGICAL TRANSITION: CONTRIBUTIONS OF INTELLIGENT AND DIGITAL TECHNOLOGIES TO MALIAN AGRICULTURE ..... 145

**LUKUBAMA MUMBELA Reddy, BAKUMBA MANGITUKULU Guy**

DE LA PRÉCARITÉ À L'AUTOFINANCEMENT DU FONCIER : LE REMEMBREMENT FONCIER COMME LEVIER DE TRANSFORMATION DES QUARTIERS SPONTANÉS À KINSHASA ..... 158

FROM PRECARITY TO LAND SELF-FINANCING: LAND READJUSTMENT AS A LEVER FOR TRANSFORMING INFORMAL SETTLEMENTS IN KINSHASA ..... 158

**Issa Koné**

CARBONE POREUX HIÉRARCHIQUE DOPÉ AVEC DU FER, DE L'AZOTE ET DU SOUFRE (FENS/HPC) POUR LA RÉACTION DE RÉDUCTION DE L'OXYGÈNE (ORR) ..... 179

HIERARCHICAL POROUS CARBON DOPED WITH IRON, NITROGEN, AND SULFUR (FENS/HPC) FOR THE OXYGEN REDUCTION REACTION (ORR) ..... 179

**CAMARA Soumaila, COULIBALY Souleymane**

ÉVALUATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT À ABSORPTION À SIMPLE EFFET ENTRAÎNÉ PAR UN CAPTEUR SOLAIRE À DOUBLE ACTION EN CLIMAT CHAUD ..... 193

PERFORMANCE EVALUATION OF A SINGLE-EFFECT ABSORPTION COOLING SYSTEM DRIVEN BY A DUAL-ACTION SOLAR COLLECTOR IN A HOT CLIMATE ..... 193

**Natié COULIBALY**

RÉSILIENCE ÉDUCATIVE AU MALI: QUELLES STRATÉGIES DES ACTEURS DE L'ÉCOLE EN CONTEXTE D'INSÉCURITÉ? ..... 210

EDUCATIONAL RESILIENCE IN MALI: WHAT STRATEGIES DO SCHOOL ACTORS ADOPT IN A CONTEXT OF INSECURITY?.....210

**Darcy LUTUMBA NKANGA**

ARBRE DE DÉCISION: FONCTIONNEMENT ET IMPACT DANS LE DOMAINE DE LA SANTÉ.....220

DECISION TREE: HOW IT WORKS AND ITS IMPACT IN THE HEALTHCARE SECTOR.....220

**KONAN Kouakou Gildas**

L'IMAGINATION MATÉRIELLE CHEZ JOSUÉ GUÉBO : UN PROCÈS EN COURS DANS SONGE À LAMPEDUSA.....229

MATERIAL IMAGINATION IN JOSHUA GUEBO : A TRIAL IN PROGRESS IN A DREAM IN LAMPEDUSA.....229

**Darcy LUTUMBA NKANGA, Richard KITONDUA LUBANZADIO, Cédric KABEYA TSHISEBA, Pierre KAFUNDA KATALAY, Josué NZUZI TSASA, Tommy BUKASA MUTOMBO, Merveil LUMBALA KATUMBA**

OPTICS: FONCTIONNEMENT ET IMPACT DANS LE DOMAINE DE LA SANTÉ.....240

OPTICS: HOW IT WORKS AND ITS IMPACT IN THE HEALTHCARE SECTOR.....240

**Oumar DEMBELE, Issa OUATTARA, Adama KONE, Mounérou DJIRE**

EMIGRATION ET CHANGEMENTS SOCIOÉCONOMIQUES DE LA VILLE DE KITA - MALI.....250

EMIGRATION AND SOCIO-ECONOMIC CHANGES IN THE CITY OF KITA-MALI.....250

**Dabiré Der, Fayama Tionyélé, Ouiminga Idrissa, Sondé T Larissa, Berre David, Toé Patrice**

TYPOLOGIE DES INTERACTIONS EN JEU DANS LA GOUVERNANCE DES RESSOURCES PASTORALES POUR S'ADAPTER AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA COMMUNE RURALE DE KOUMBIA AU BURKINA FASO: ENTRE HIÉRARCHIE, MÉDIATION, COOPÉRATION ET CONFLIT.....264

A TYPOLOGY OF INTERACTIONS INVOLVED IN THE GOVERNANCE OF PASTORAL RESOURCES TO ADAPT TO THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE IN THE RURAL COMMUNE OF KOUMBIA, BURKINA FASO: BETWEEN HIERARCHY, MEDIATION, COOPERATION, AND CONFLICT.....264

**Mahmoud Ag ALY, Cheick Kader M'BAYE, Falingué KEITA**

INVESTISSEMENTS EN INFRASTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE AU MALI ..... 274

INVESTMENT IN ENERGY INFRASTRUCTURE AND ECONOMIC GROWTH IN MALI ..... 274

**Sékou Dit Karamoko KEITA, Boubacar SY**

RÔLE DE LA FIXATION DU PRIX DU COTON ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE DU MALI ..... 284

THE ROLE OF COTTON PRICING IN MALI'S ECONOMIC GROWTH ..... 284

**Oumar SK DEMBELE, ABDOUL Karim CAMARA**

HÉTÉROGÉNÉİTE ÉNONCIATIVE ET CONSTRUCTION DU SENS: UNE LECTURE DISCURSIVE À LA LUMIÈRE DES TRAVAUX DE JACQUELINE AUTHIER-REVUZ..... 294

ENUNCIATIVE HETEROGENEITY AND THE CONSTRUCTION OF MEANING: A DISCURSIVE ANALYSIS IN LIGHT OF THE WORK OF JACQUELINE AUTHIER-REVUZ..... 294

# CARBONE POREUX HIERARCHIQUE DOPE AVEC DU FER, DE L'AZOTE ET DU SOUFRE (FENS/HPC) POUR LA REACTION DE REDUCTION DE L'OXYGENE (ORR)

# HIERARCHICAL POROUS CARBON DOPED WITH IRON, NITROGEN, AND SULFUR (FENS/HPC) FOR THE OXYGEN REDUCTION REACTION (ORR)

**Dr Issa Koné, Maitre-Assistant,**
Email : iklemanitou@163.com

DER Sciences Fondamentales de Base, Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche appliquée IPR/IFRA, Katibougou, Mali

Laboratoire National Fondamental de Recherche sur l'Évaluation des Nouveaux Produits Chimiques Dangereux et l'Analyse des Accidents, Université de Technologie Chimique de Pékin, 100029 Pékin, R. P. Chine

## Résumé

Un catalyseur à base de carbone poreux hiérarchique dopé avec du fer, de l'azote et du soufre (FeNS/HPC) a été synthétisé par une méthode en deux étapes: (1) pyrolyse à 900°C d'un mélange solide contenant du glucose (source de carbone), de la thiourée (sources de N et S), du nitrate de fer et des particules de silice ($SiO_2$, template macroporeux) ; (2) lessivages successifs : d'abord par NaOH pour éliminer le template $SiO_2$, puis par HCl pour dissoudre les nanoparticules de $Fe_2O_3$ formées *in situ*, ce qui crée une mésoporosité additionnelle. Le matériau FeNS/HPC présente une structure hiérarchique (micro-, méso- et macropores), une surface spécifique élevée (1148 $m^2/g$) et une fine coque de carbone graphitique d'environ 4 nm d'épaisseur. Teneur élevée en N-graphitique (5,1 % at.) et N-pyridinique (91 % cumulés), présence de S-thiophénique, d'espèces Fe-$N_x$ et de nanoparticules de Fe encapsulées dans du carbone graphitique. L'influence de la température de pyrolyse (700-1000 °C) sur les propriétés structurales et électrocatalytiques de FeNS/HPC a été étudiée. Le catalyseur FeNS/HPC dépasse le catalyseur commercial Pt/C avec un potentiel de début plus élevé (0,97 V contre 0,93 V), un potentiel de demi-onde de (0,87 V contre 0,83 V), une densité de courant de diffusion de (5,5 mA $cm^{-2}$ contre 5,3 mA $cm^{-2}$) et un transfert électronique proche de 4 (voie à $4e^-$). Ce catalyseur présente également une excellente stabilité (90 % de courant retenu) et une tolérance remarquable au méthanol.

**Mots-clés: carbone poreux hiérarchique, lessivage alcalin, lessivage acide, N-graphitique, réaction de réduction de l'oxygène (ORR), température de pyrolyse.**

## Abstract

A hierarchical porous carbon-based catalyst doped with iron, nitrogen and sulfur (FeNS/HPC) was synthesized using a two-step method: (i) pyrolysis at 900 °C of a solid mixture containing glucose (carbon source), thiourea (N and S sources), iron nitrate, and silica particles ($SiO_2$, macroporous template) ; (ii) successive leaching, first with NaOH to remove the $SiO_2$ template, then with HCl to dissolve the in situ formed $Fe_2O_3$ nanoparticles, which creates additional mesoporosity. The FeNS/HPC material exhibits a hierarchical structure (micro-, meso- and macropores), a high specific surface area (1148 $m^2/g$) and a thin graphitic carbon shell of approximately 4 nm in thickness. It shows high content of graphitic N (5.1 at. %) and pyridinic N (91 % combined), as well as the presence of thiophene-S, Fe-$N_x$ species and Fe nanoparticles encapsulated in graphitic carbon. The influence of the pyrolysis temperature (700–1000 °C) on

the structural and electrocatalytic properties of FeNS/HPC was investigated. The FeNS/HPC catalyst outperforms commercial Pt/C, with a higher onset potential (0.97 V vs. 0.93 V), a higher half-wave potential (0.87 V vs. 0.83 V), a higher diffusion current density (5.5 mA $cm^{-2}$ vs. 5.3 mA $cm^{-2}$) and an electron transfer number close to 4 ($4e^-$ pathway). This catalyst also exhibits excellent stability (90 % current retention) and remarkable methanol tolerance.

**Keywords: hierarchical porous carbon, alkaline leaching, acid leaching, Graphitic-N, oxygen reduction reaction (ORR), pyrolysis temperature.**

## Introduction

La réaction de réduction de l'oxygène (ORR) joue un rôle crucial dans les technologies avancées de conversion et de stockage d'énergie, telles que les batteries métal-air et les piles à combustible(Li et al., 2013). Cependant, ses performances sont limitées par la lenteur de la cinétique de l'ORR. Le platine (Pt) et ses alliages sont considérés comme les électrocatalyseurs les plus actifs, mais ils souffrent de leur rareté, de leur coût prohibitif et de leur faible stabilité (Mayrhofer & Arenz, 2009). Récemment, des progrès notables ont été réalisés dans le développement d'électrocatalyseurs non précieux, notamment les carbones dopés avec du Fe, du Co et des hétéroatomes (N, S, P, B ou F) (Dai et al., 2015).

L'azote, dont l'électronégativité (3,04) est supérieure à celle du carbone (2,55), modifie la structure électronique des matériaux carbonés tout en minimisant le désaccord de réseau(Gong et al., 2009). Il a été rapporté que l'azote sous ses formes graphitique et pyridinique facilite la réduction de l'oxygène(Kim et al., 2011). Le N-graphitique favorise la réduction par la voie à $4e^-$, améliorant ainsi le potentiel de début de réduction et le courant limite de diffusion(Lai et al., 2015). Quant au soufre, bien que son électronégativité soit proche de celle du carbone, les espèces soufrées (comme le S-thiophénique) induisent une redistribution du spin électronique, contribuant à l'amélioration de l'activité de l'ORR (Jeon et al., 2013). Les métaux de transition, en particulier le Fe, permettent l'introduction de N et de S dans les carbones et la formation de coquilles graphitiques encapsulant des espèces métalliques actives (Fe-$N_x$, $Fe_3C$)(Z. Wu et al., 2015a). Ces dernières ont été reconnues comme des sites hautement actifs pour l'ORR (Jiang et al., 2016; Kong et al., 2014a).

Un électrocatalyseur performant doit posséder une surface spécifique élevée, une structure poreuse optimale et une bonne conductivité électronique(Chen et al., 2023; Ferrero et al., 2016). Cependant, dans la plupart des carbones poreux, les sites actifs situés au fond des micropores sont difficilement accessibles (Choi et al., 2017). Pour remédier à ce problème, les matériaux carbonés hiérarchiquement poreux (micro-, méso- et macropores) ont suscité un grand intérêt (He et al., 2014). Néanmoins, leur synthèse implique souvent des procédures complexes, plusieurs types de motifs et des réactifs toxiques (Eisenberg et al., 2016).

Dans ce contexte, la question centrale de ce travail est de savoir si une voie de synthèse simple peut produire un carbone dopé Fe/N/S à structure hiérarchique capable de rivaliser avec le Pt en termes d'activité ORR, de stabilité et de tolérance au méthanol. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est de développer un électrocatalyseur non noble performant pour l'ORR, susceptible de concurrencer le platine dans des applications énergétiques telles que les piles à combustible et les batteries métal-air. Les objectifs spécifiques sont (i) de synthétiser un carbone poreux hiérarchique dopé Fe/N/S (noté FeNS/HPC) par une méthode simple; (ii) d'en caractériser la structure et la composition chimique; (iii) d'évaluer ses performances électrocatalytiques pour l'ORR; et (iv) de comparer ces performances avec celles de catalyseurs de référence, en particulier à base de Pt, afin d'évaluer sa viabilité en tant qu'alternative.

Nous rapportons ici la synthèse d'un carbone poreux hiérarchique (FeNS/HPC) par une méthode simple utilisant du glucose, de la thiourée, du nitrate de fer et de la $SiO_2$, suivie de lessivages alcalin et acide. Le catalyseur FeNS/HPC ainsi préparé présente une teneur élevée en N-graphitique et N-pyridinique (91 %), ainsi que du S-thiophénique, des espèces Fe-$N_x$ et des nanoparticules de Fe encapsulées dans du carbone graphitique. Grâce à ces caractéristiques, FeNS/HPC montre une activité exceptionnelle, une excellente durabilité et une remarquable tolérance au méthanol pour la réduction de $O_2$ par la voie à $4e^-$, offrant ainsi une alternative prometteuse aux catalyseurs à base de platine pour les piles à combustible et les batteries métal-air.

## 1. Procédures expérimentales

### 1.1.Préparation des catalyseurs

Du glucose, de la thiourée, du nitrate de fer et de la silice (d ~ 100 nm) dans un rapport pondéral de 1:4:0,3:4 à l'état solide ont été mélangés et broyés en une poudre fine. La poudre a été chauffée à différentes températures (700, 800, 900 ou 1000 °C) et maintenue pendant 2 heures dans un four à tube en quartz sous atmosphère d'argon (80 mL $min^{-1}$) à une vitesse de chauffe de 5 °C $min^{-1}$.

Après décomposition et carbonisation, la surface de la silice s'est recouverte de produits carbonisés contenant des espèces Fe/$Fe_2O_3$. Le composite FeNSC@$SiO_2$ obtenu a subi deux lessivages successifs:

(1) **Lessivage alcalin**: le composite a été traité par une solution de NaOH 2 M pendant 12 heures pour éliminer le motif $SiO_2$. Le matériau obtenu est noté FeNS/PC (Fe/N/S-doped porous carbon après lessivage alcalin uniquement).

(2) **Lessivage acide**: le matériau FeNS/PC a ensuite été lavé avec une solution de HCl 6 M pendant 6 heures pour éliminer les espèces inorganiques de fer (notamment $Fe_2O_3$). Le matériau final est noté FeNS/HPC (Fe/N/S-doped hierarchical porous carbon après lessivages alcalin et acide).

Les matériaux préparés à différentes températures sont notés FeNS/HPC-x, où x = 700, 800, 900 ou 1000 °C. Sauf indication contraire, la température de pyrolyse utilisée est 900 °C.

### 1.2.Caractérisation physique

Les surfaces spécifiques et les distributions de taille des pores ont été déterminées par les méthodes BET et BJH à partir d'isothermes d'adsorption-désorption d'azote. La morphologie a été étudiée par MET et HRMET. Les structures cristallines ont été analysées par DRX. Les compositions chimiques de surface ont été étudiées par XPS.

### 1.3. Mesures électrochimiques

Les activités ORR ont été testées par voltammétrie cyclique (CV, 50 mV $s^{-1}$), voltammétrie linéaire à balayage (LSV, 5 mV $s^{-1}$) et électrode à disque-anneau tournant (RRDE) dans une solution de KOH 0,1 M saturée en Ar ou $O_2$. Une électrode de travail modifiée par le catalyseur (charge de 0,2 mg $cm^{-2}$) a été utilisée. Un Pt/C commercial (20 % en poids) a servi de référence.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Effet du lessivage alcalin (obtention de FeNS/PC)

Après pyrolyse à 900 °C et lessivage alcalin (NaOH), le matériau FeNS/PC présente une structure poreuse avec de nombreuses nanoparticules réparties uniformément sur la matrice carbonée (Figure 1a) (Jiang et al., 2016). La microscopie électronique en transmission (MET) montre que la plupart de ces nanoparticules ont une taille inférieure à 20 nm, voire à 10 nm. La microscopie électronique à haute résolution (HRMET) (Figure 1b) révèle une distance réticulaire de 0,25 nm correspondant au plan (311) de $Fe_2O_3$ (Kong et al., 2014a). L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de FeNS/PC (Figure 2a) confirme la présence de pics caractéristiques de γ-$Fe_2O_3$ à 30,2°, 35,7°, 54,0°, 57,6° et 61,1°. Le pic à 25° indique la présence de carbone graphitique. La surface spécifique BET de FeNS/PC est de 672 $m^2\ g^{-1}$ (Figure 2d), avec une porosité dominée par des micropores et des macropores(Cheon et al., 2016).

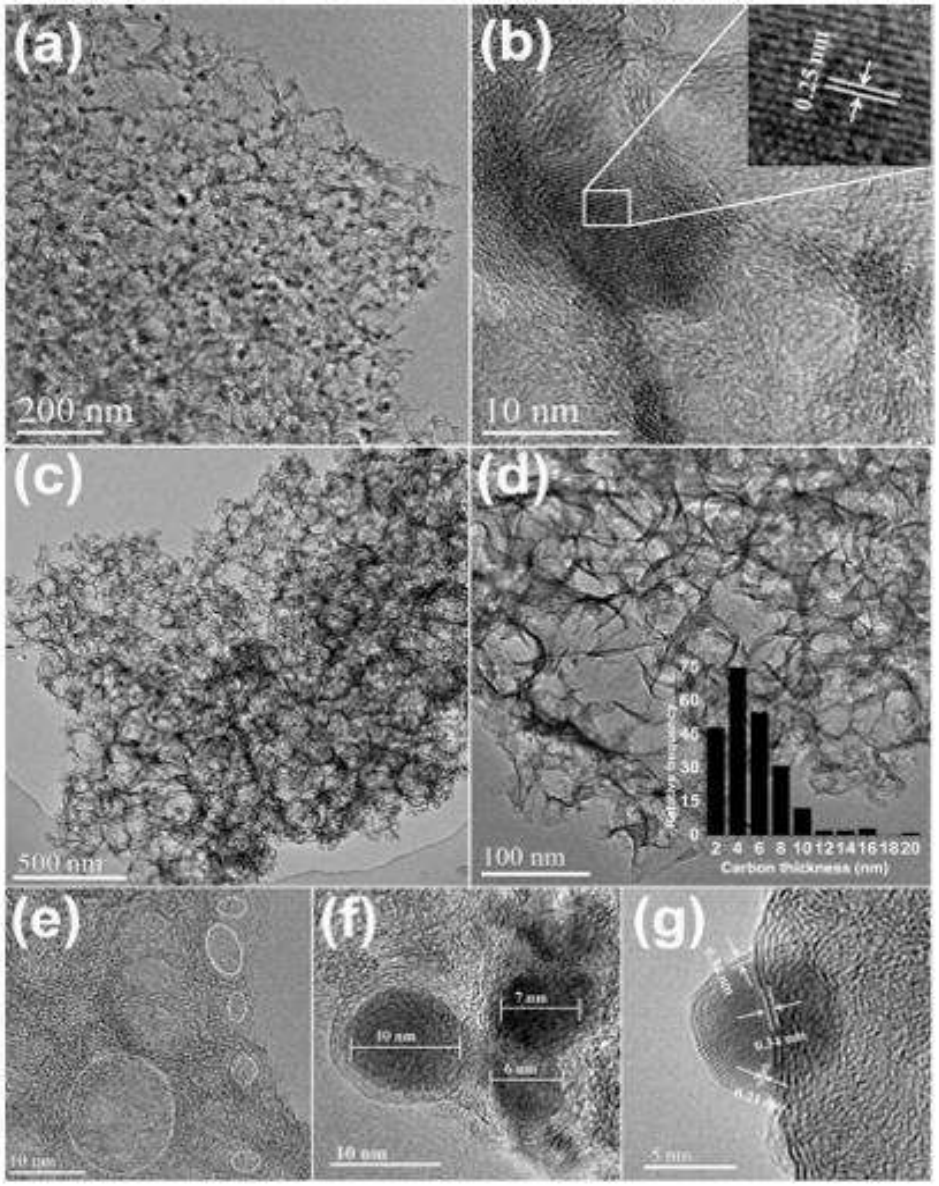



**Figure 1.** Images MET de (a) FeNS/PC et (c) FeNS/HPC ; images HRMET de (b) FeNS/PC et (d-g) FeNS/HPC (Issa et al., 2017).

### 2.2. Effet du lessivage acide (obtention de FeNS/HPC)

Le lessivage acide (HCl) de FeNS/PC permet d'obtenir FeNS/HPC. Les images MET (Figure 1c, d) montrent que la plupart des nanoparticules de $Fe_2O_3$ ont disparu après ce traitement (Yang et al., 2025). L'analyse thermogravimétrique (Figure 2f) indique que le résidu pondéral chute de 35 % pour FeNS/PC à moins de 5 % pour FeNS/HPC. Les diffractogrammes DRX de FeNS/HPC (Figure 2a) ne présentent plus les pics de $Fe_2O_3$, confirmant leur élimination complète pour les échantillons préparés à toutes les températures (Figure 2a, b) (Z. Wu et al., 2015b).

Les images MET de FeNS/HPC (Figure 1c, d) révèlent une structure macroporeuse dont le diamètre diffère légèrement de celui du motif $SiO_2$ d'origine, indiquant un certain rétrécissement ou effondrement des coquilles de carbone après les lessivages (Kong et al., 2014b). L'épaisseur de la coquille carbonée est d'environ 4 nm (Figure 1d). Une observation cruciale est l'apparition de nombreux mésopores (taille de quelques nanomètres à 10 nm) sur la matrice carbonée (Figure 1e), démontrant que le lessivage acide des nanoparticules de $Fe_2O_3$ génère une abondante mésoporosité (Jiang et al., 2016). La HRMET (Figure 1f, g) montre que quelques nanoparticules résiduelles (6-10 nm) subsistent après lessivage acide; elles sont encapsulées dans plusieurs couches (2 à 5) de carbone graphitique. Les distances réticulaires de 0,21 nm et 0,34 nm correspondent respectivement au plan (111) du Fe métallique et au plan (002) du carbone graphitique(Z. Wu et al., 2015a). Cette encapsulation protège les nanoparticules de Fe de la dissolution acide et de l'oxydation à l'air.

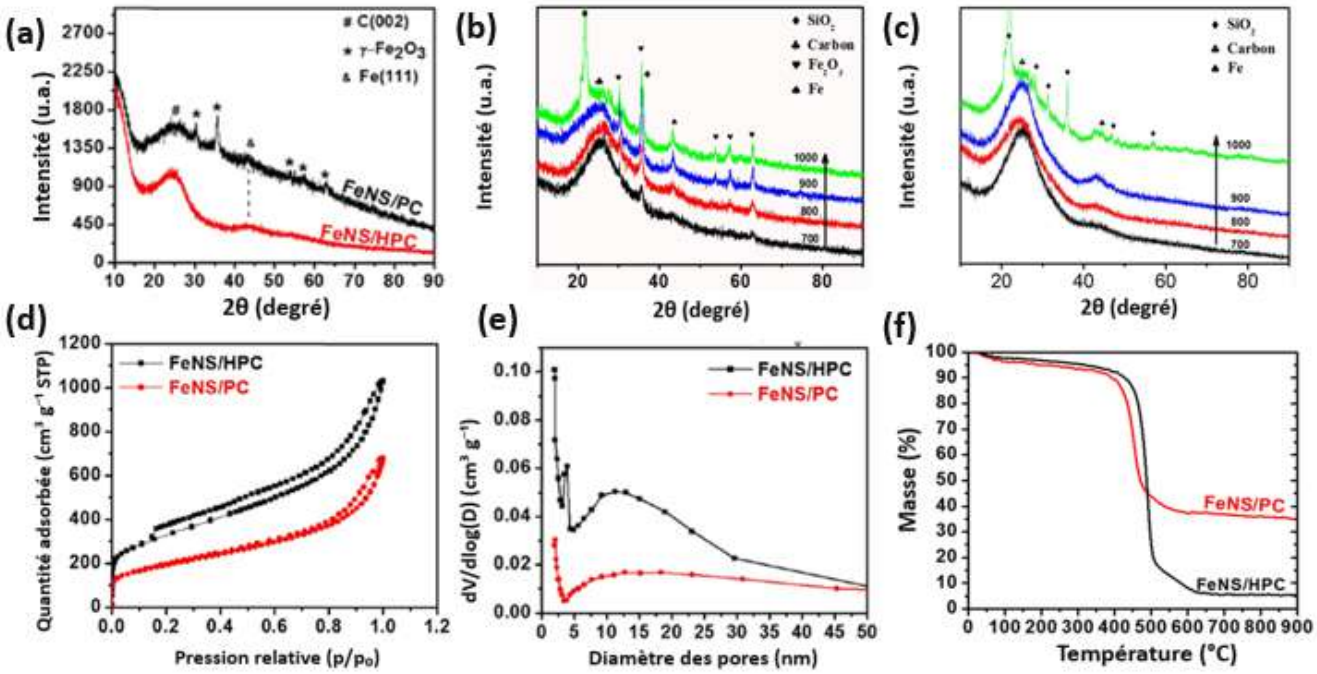



**Figure 2. (a) Diagrammes de diffraction des rayons X (DRX) de FeNS/PC et FeNS/HPC, (b)** FeNS/HPC-x (avant lessivage acide) (c) FeNS/HPC-x00 (après lessivage acide), (d) isothermes d'adsorption-désorption de $N_2$ de FeNS/PC et FeNS/HPC, (e) distributions de taille des mésopores (PSD) dans FeNS/PC et FeNS/HPC, (f) Courbes d'analyse thermogravimétrique (TGA) de FeNS/PC et FeNS/HPC (Issa et al., 2017).

### 2.3. Comparaison des surfaces spécifiques et de la porosité

Les isothermes d'adsorption-désorption de $N_2$ (Figure 2d) sont de type II avec boucle H4. L'augmentation brutale de l'adsorption à basse pression ($p/p_0 < 0,01$) indique des micropores abondants, tandis que celle à haute pression ($p/p_0 > 0,9$) confirme une grande quantité de

macropores. La boucle étendue à pression moyenne ($0,2 < p/p_0 < 0,8$) pour FeNS/HPC atteste de la présence de nombreux mésopores, contrairement à FeNS/PC (Cheon et al., 2016).

La surface spécifique BET augmente considérablement après lessivage acide, passant de 672 $m^2\ g^{-1}$ (FeNS/PC) à 1148 $m^2\ g^{-1}$ (FeNS/HPC). La distribution de taille des pores (Figure 2e) montre un pic centré à 4 nm caractéristique de FeNS/HPC, absent dans FeNS/PC. Ce pic correspond à l'élimination des nanoparticules de $Fe_2O_3$ dont la taille est majoritairement inférieure à 5 nm (Jiang et al., 2016).

### 2.4. Composition chimique de surface de FeNS/HPC

**Tableau 1.** Composition élémentaire (analyse XPS) (Issa et al., 2017)

| Élément | C (%) | O (%) | Si (%) | Fe (%) | N (%) | S (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur | 76,92 | 12,04 | 1,52 | 0,64 | 7,21 | 1,67 |

L'analyse XPS (Figure 3a, Tableau 1) révèle la présence de C, O, N, S et de traces de Fe et Si (Zitolo et al., 2015). La teneur atomique en azote atteint 7,21 %. Le spectre haute résolution N1s (Figure 3b) montre trois formes d'azote dopé: N graphitique (401,1 eV, 70 %), N pyrrolique (399,6 eV, 9 %) et N pyridinique (398,3 eV, 21 %). La teneur en N graphitique par rapport à l'ensemble des éléments est de 5,1 %, un niveau extrêmement élevé (Figure 3d) (Lai et al., 2015). Le pourcentage atomique de soufre est de 2,1 % et le spectre haute résolution de S2p (Figure 3c) a été décomposé en trois pics à 163,9, 164,9 et 169,0 eV. Les deux premiers pics sont attribués respectivement au C-S-C $2p_{3/2}$ et C-S-C $2p_{1/2}$ du thiophene-S (68 %), et le troisième pic représente les groupes soufrés oxydés (C-$SO_x$-C 2p, x = 1, 2, 3, 32 %) ((Cheon et al., 2016; Gu et al., 2025). Ces résultats démontrent que les espèces azotées dominées par les formes graphitique/pyridinique (91 %) et le thiophene-S ont été introduits avec succès dans le FeNS/HPC préparé.

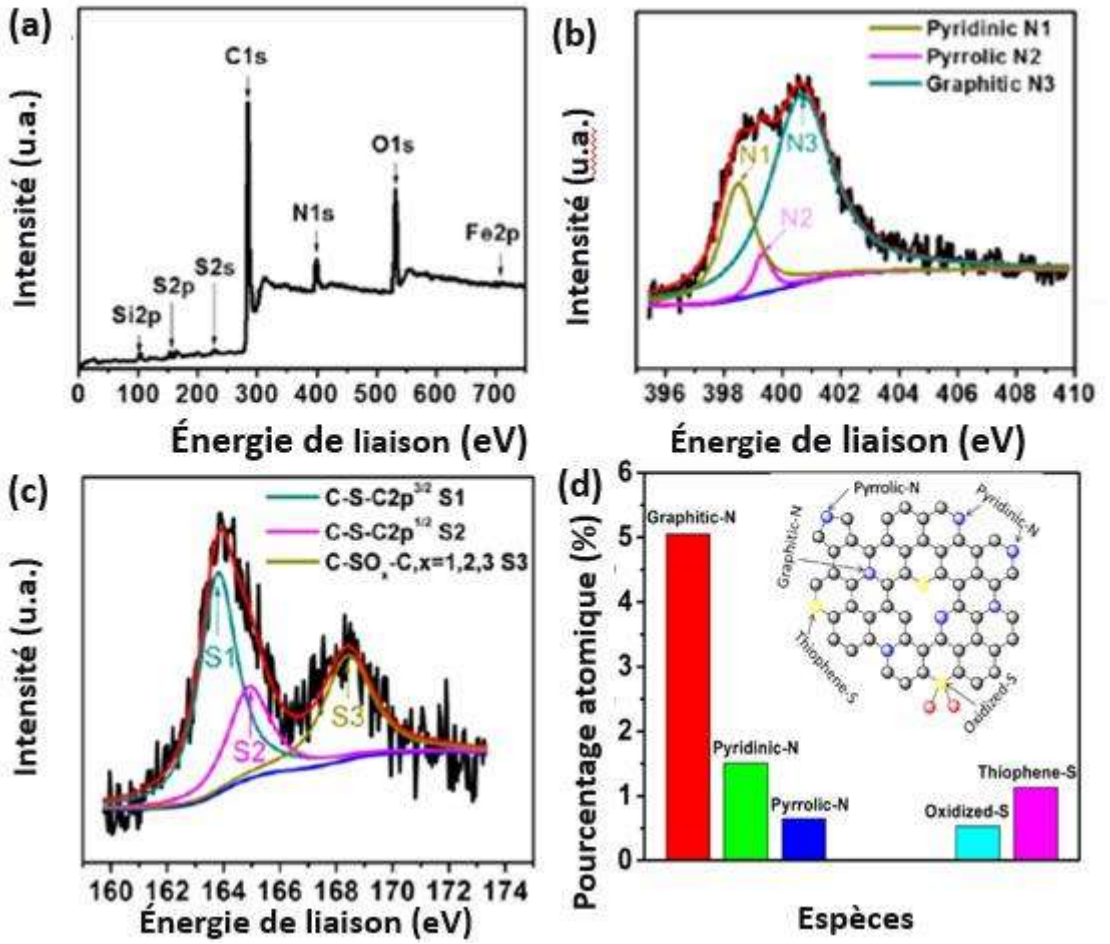



**Figure 3.** (a) Spectre XPS large de FeNS/HPC, (b) spectre haute résolution N1s, (c) spectre haute résolution S2p, (d) pourcentage atomique des espèces-N, S (Issa et al., 2017).

### 2.5. Performances électrocatalytiques de FeNS/HPC

Les courbes CV (Figure 4a) montrent que la surface électrochimiquement accessible de FeNS/HPC est environ deux fois supérieure à celle de FeNS/PC. En milieu saturé en $O_2$, les pics ORR apparaissent à 0,82 V pour FeNS/PC et 0,83 V pour FeNS/HPC. Les courbes LSV à 1600 tr/min (Figure 4b) indiquent que les courants cinétiques sont similaires pour les deux matériaux, mais que FeNS/HPC présente un courant de diffusion limite nettement supérieur (supérieur de 0,7-0,9 mA $cm^{-2}$). Les pentes de Tafel dans l'insert sont identiques, prouvant que la nature des sites actifs n'est pas modifiée par le lessivage acide. Les mesures à différentes vitesses de rotation (400-2500 rpm, Figures 4c, d) donnent un nombre d'électrons transféré de 3,96-3,99 pour FeNS/HPC (K-L plots), confirmant une réduction quasi-totale par voie à $4e^-$.

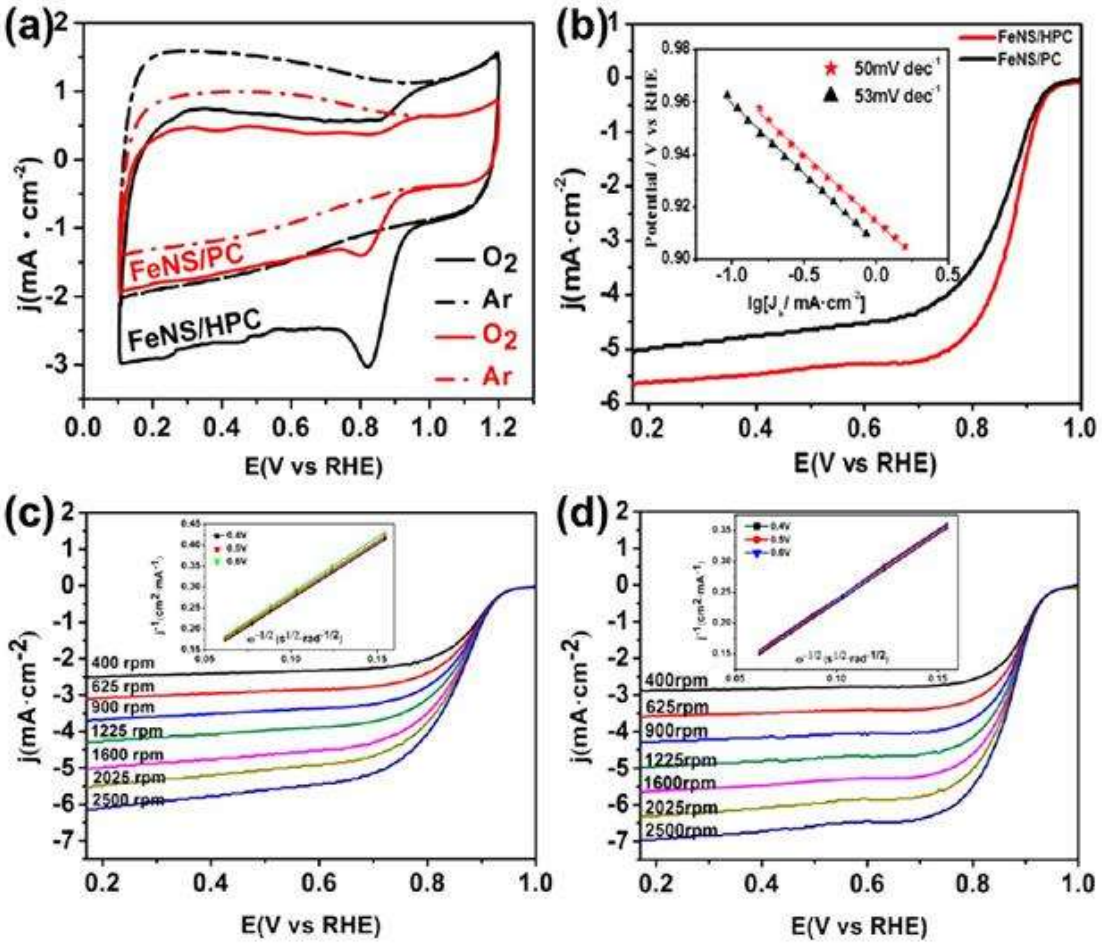



**Figure 4.** (a) Courbes de voltammétrie cyclique (CV) des électrodes modifiées par FeNS/PC et FeNS/HPC dans KOH 0,1 M saturé en Ar et en $O_2$ à une vitesse de balayage de 50 mV $s^{-1}$ ; (b) Courbes de voltammétrie linéaire à balayage (LSV) de FeNS/PC et FeNS/HPC à une vitesse de balayage de 5 mV $s^{-1}$ avec une vitesse de rotation de 1600 tr/min dans KOH 0,1 M saturé en $O_2$. La figure en médaillon montre les diagrammes de Tafel des deux catalyseurs dans la région cinétique; (c, d) Courbes LSV de l'ORR de FeNS/PC et FeNS/HPC à différentes vitesses de rotation de 400 à 2500 tr/min dans KOH 0,1 M saturé en $O_2$, respectivement. Les diagrammes de Koutecky-Levich correspondants sont présentés dans les médaillons. Toutes les courbes LSV de l'ORR sont calibrées après correction du courant de fond (Issa et al., 2017).

En termes d'activité intrinsèque (Figures 5a), FeNS/HPC ne dépasse pas non seulement FeNS/PC, mais est encore beaucoup plus actif que le Pt/C, avec des potentiels de début et de demi-onde décalés positivement de 40 mV, comme le montre le Tableau 2.

**Tableau 2.** Paramètres électrochimiques de l'ORR sur FeNS/HPC, FeNS/HPC et Pt/C (Issa et al., 2017)

| Matériau | $E_{début}$ (V) | $E_{1/2}$ (V) | $I_d$ (mA $cm^{-2}$) |
|---|---|---|---|
| FeNS/PC | 0,96 | 0,82 | 4,5 |
| FeNS/HPC | 0,97 | 0,87 | 5,5 |
| Pt/C | 0,93 | 0,83 | 5,3 |

Ainsi le lessivage acide transforme un bon catalyseur (FeNS/PC) en un catalyseur exceptionnel (FeNS/HPC), surpassant en termes d'activité le catalyseur commercial Pt/C, due à la création d'une mésoporosité et l'exposition des sites actifs jusqu'alors enfouis sous les nanoparticules de $Fe_2O_3$. Les tests RRDE (Figures 5a, b) montrent un rendement en $H_2O_2$ de 4-5 % pour FeNS/HPC, identique à celui du Pt/C, et un nombre d'électrons transféré de 3,88-3,92.

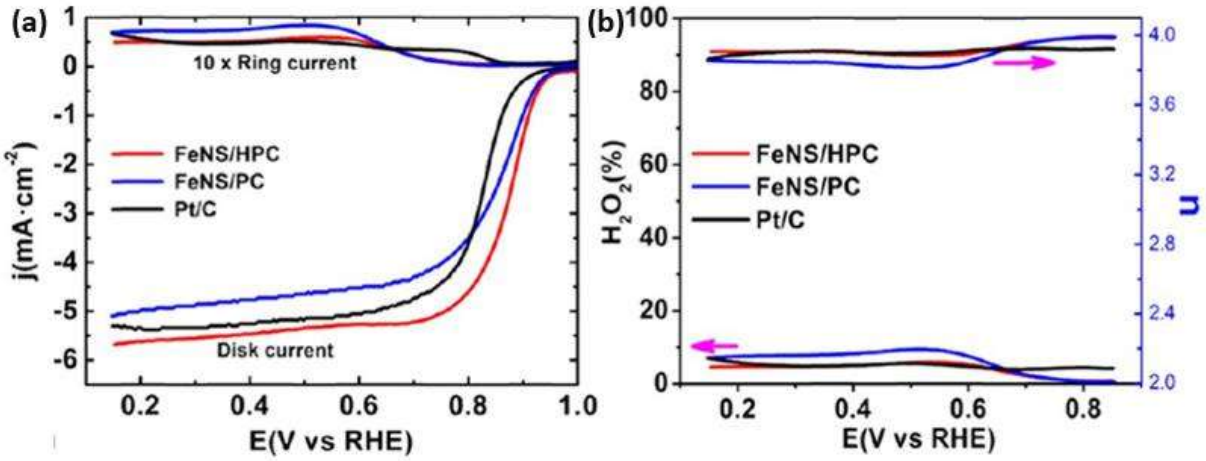



**Figure 5.** (a) Test RRDE de l'ORR sur FeNS/PC, FeNS/HPC et Pt/C commercial ; (b) les rendements de production de $H_2O_2$ correspondants et le nombre d'électrons transférés basés sur les tests RRDE (Issa et al., 2017).

Le tableau 3 ci-dessus compare les performances électrocatalytiques de FeNS/HPC avec cinq autres matériaux rapportés dans la littérature, sur la base de trois paramètres clés: le potentiel de début ($E_{début}$), le potentiel de demi-onde ($E_{1/2}$) et la densité de courant limite ($I_d$).

**Tableau 3.** Comparaison des résultats avec la littérature

| Catalyseur | $E_{début}$ (V vs RHE) | $E_{1/2}$ (V vs RHE) | $I_d$ (mA $cm^{-2}$) |
|---|---|---|---|
| FeNS/HPC(Issa et al., 2017) | 0,97 | 0,87 | 5,5 |
| Fe-NSC (Jia et al., 2020) | 1,09 | 0,92 | 5,3 |
| FeSN-HPC (Gao et al., 2020) | 0,94 | 0,86 | 5,4 |
| Fe-N-C/$NH_3$ (Battistella et al., 2023) | 0,99 | 0,88 | 5,9 |
| Fe-N-C/Ar (B. Wu, 2023) | 0,97 | 0,85 | 5,5 |
| $Fe_9S_{10}$/N,S-G (Ma et al., 2017) | 0,96 | 0,80 | 5,7 |

Le Fe-NSC (Jia et al., 2020) affiche les meilleurs $E_{début}$ (1,09 V) et $E_{1/2}$ (0,92 V). Cette performance exceptionnelle est attribuée à la présence de sites Fe-$N_4$ atomiquement dispersés, considérés comme les centres actifs les plus efficaces pour l'ORR. Cependant, son courant limite (5,3 mA $cm^{-2}$) est légèrement inférieur à celui de FeNS/HPC, ce qui suggère une accessibilité des sites actifs potentiellement limitée par sa structure poreuse.

Le Fe-N-C/$NH_3$ (Battistella et al., 2023) bénéficie d'un traitement à l'ammoniac qui améliore à la fois le dopage en azote et la porosité, d'où son courant limite élevé (5,9 mA $cm^{-2}$) et son bon $E_{1/2}$ (0,88 V). Ce traitement constitue une voie d'amélioration intéressante à explorer pour nos futurs travaux.

### 2.6.Effet de la température de pyrolyse sur FeNS/HPC

Des échantillons FeNS/HPC ont été préparés à 700, 800, 900 et 1000 °C. Les courbes LSV (Figure 6a) et les paramètres électrochimiques (Tableau 4) montrent que les performances augmentent de 700 à 900 °C puis diminuent à 1000 °C.

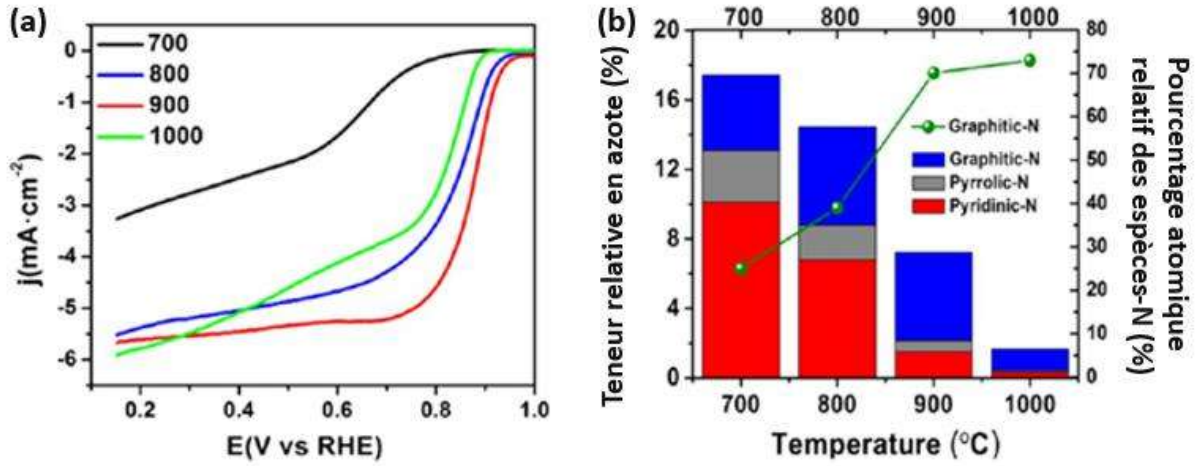



**Figure 6.** (a) Courbes LSV de FeNS/HPC préparé à différentes températures dans KOH 0,1 M saturé en $O_2$ à 1600 tr/min ; (b) pourcentage atomique relatif des espèces-N sur FeNS/HPC préparé à différentes températures (Issa et al., 2017).

**Tableau 4.** Paramètres électrochimiques de l'ORR sur FeNS/HPC à différentes températures (Issa et al., 2017)

| Matériau | $E_{début}$ (V) | $E_{1/2}$ (V) | $I_d$ (mA cm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|
| FeNS/HPC-700 | 0,82 | 0,64 | 2,4 |
| FeNS/HPC-800 | 0,94 | 0,84 | 4,9 |
| FeNS/HPC-900 | 0,97 | 0,87 | 5,5 |
| FeNS/HPC-1000 | 0,89 | 0,82 | 4,9 |

L'analyse XPS (Figure 6b) montre que la teneur en N graphitique augmente avec la température jusqu'à 900 °C, puis diminue à 1000 °C en raison d'une perte excessive d'azote. La surface spécifique diminue également à 1000 °C. La température optimale de 900 °C permet d'atteindre le meilleur compromis entre graphitisation, conservation des hétéroatomes et développement de la porosité (Yang et al., 2025).

### 2.7. Stabilité et tolérance au méthanol

Le test de tolérance au méthanol (Figure 7a) montre qu'après injection de méthanol, le courant du Pt/C chute brutalement alors que celui de FeNS/HPC reste stable. Le test de stabilité à long terme (Figure 7b) indique une rétention de courant de 90 % pour FeNS/HPC après 20 000 s, contre seulement 74 % pour le Pt/C.

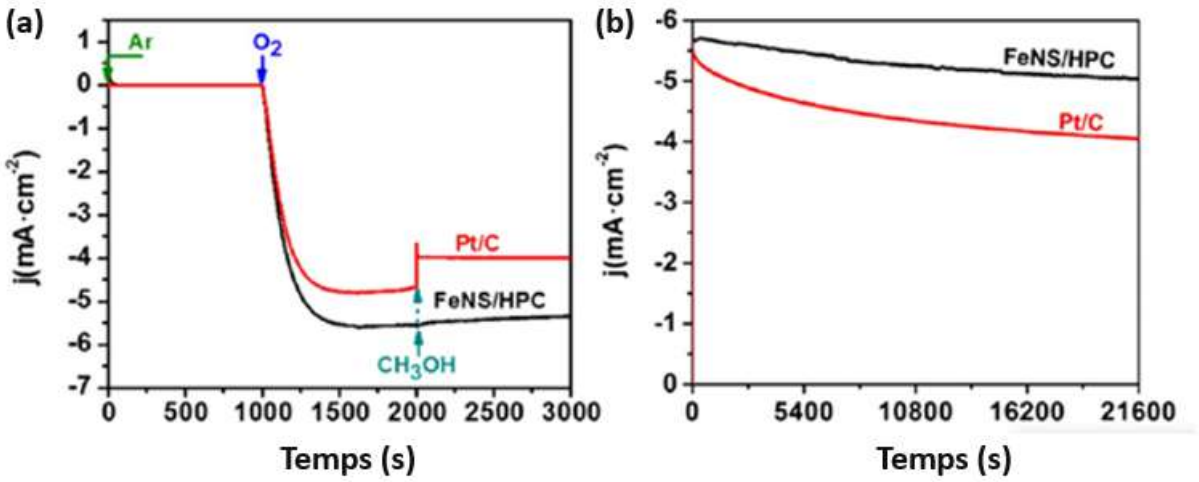



**Figure 7.** (a) Test de crossover (tolérance au méthanol) de FeNS/HPC et du Pt/C commercial dans une solution de KOH 0,1 M - méthanol 1 M saturée en $O_2$ à 0,4 V avec une vitesse de rotation de 1600 tr/min et (b) test de durabilité à long terme de FeNS/HPC et du Pt/C commercial dans une solution de KOH 0,1 M saturée en $O_2$ à 0,4 V à 1600 tr/min (Issa et al., 2017).

## 3. Conclusions

En résumé, un carbone poreux hiérarchique avec une teneur élevée en N graphitique et codopé avec des espèces de soufre et de fer (FeNS/HPC) a été synthétisé par une méthode simple de pyrolyse en une seule étape, suivie de l'élimination de la silice macroporeuse ajoutée et des nanoparticules de $Fe_2O_3$ générées in situ. Les lessivages alcalin (NaOH) et acide (HCl) successifs du composite FeNSC@$SiO_2$ permettent d'obtenir un carbone poreux hiérarchique FeNS/HPC présentant : (1) une surface spécifique de 1148 $m^2\ g^{-1}$ (contre 672 $m^2\ g^{-1}$ après seul lessivage alcalin); (2) une structure hiérarchique micro/méso/macroporeuse, avec des mésopores issus de la dissolution des nanoparticules de $Fe_2O_3$ ; (3) une teneur exceptionnelle en azote graphitique (5,1 %, soit 70 % des espèces N) ; (4) des performances ORR optimales pour une température de pyrolyse de 900 °C : $E_{début}$ = 0,97 V, $E_{1/2}$ = 0,87 V, $I_d$ = 5,5 mA $cm^{-2}$, surpassant le Pt/C commercial ; (5) une excellente stabilité (90 % de courant retenu) et une tolérance remarquable au méthanol.

Le matériau FeNS/HPC constitue ainsi un candidat prometteur comme électrocatalyseur non noble pour la réduction de l'oxygène dans les piles à combustible et les batteries métal-air.

## Références bibliographiques

Battistella, B., Iffland-Mühlhaus, L., Schütze, M., Cula, B., Kuhlmann, U., Dau, H., Hildebrandt, P., Lohmiller, T., Mebs, S., Apfel, U., & Ray, K. (2023). Evidence of Sulfur Non-Innocence in [$Co^{II}$ (dithiacyclam)]$^{2+}$ -Mediated Catalytic Oxygen Reduction Reactions. *Angewandte Chemie International Edition*, *62*(6), e202214074. https://doi.org/10.1002/anie.202214074

Chen, G., Lu, R., Li, C., Yu, J., Li, X., Ni, L., Zhang, Q., Zhu, G., Liu, S., Zhang, J., Kramm, U. I., Zhao, Y., Wu, G., Xie, J., & Feng, X. (2023). Hierarchically Porous Carbons with Highly Curved Surfaces for Hosting Single Metal $FeN_4$ Sites as Outstanding Oxygen Reduction Catalysts. *Advanced Materials*, *35*(32), 2300907. https://doi.org/10.1002/adma.202300907

Cheon, J. Y., Kim, K., Sa, Y. J., Sahgong, S. H., Hong, Y., Woo, J., Yim, S., Jeong, H. Y., Kim, Y., & Joo, S. H. (2016). Graphitic Nanoshell/Mesoporous Carbon Nanohybrids as Highly Efficient and Stable Bifunctional Oxygen Electrocatalysts for Rechargeable Aqueous Na–Air

Batteries. *Advanced Energy Materials*, *6*(7), 1501794. https://doi.org/10.1002/aenm.201501794

Choi, J.-Y., Yang, L., Kishimoto, T., Fu, X., Ye, S., Chen, Z., & Banham, D. (2017). Is the rapid initial performance loss of Fe/N/C non precious metal catalysts due to micropore flooding? *Energy & Environmental Science*, *10*(1), 296-305.

Dai, L., Xue, Y., Qu, L., Choi, H.-J., & Baek, J.-B. (2015). Metal-Free Catalysts for Oxygen Reduction Reaction. *Chemical Reviews*, *115*(11), 4823-4892. https://doi.org/10.1021/cr5003563

Eisenberg, D., Stroek, W., Geels, N. J., Tanase, S., Ferbinteanu, M., Teat, S. J., Mettraux, P., Yan, N., & Rothenberg, G. (2016). A rational synthesis of hierarchically porous, N-doped carbon from Mg-based MOFs : Understanding the link between nitrogen content and oxygen reduction electrocatalysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *18*(30), 20778-20783.

Ferrero, G. A., Preuss, K., Marinovic, A., Jorge, A. B., Mansor, N., Brett, D. J. L., Fuertes, A. B., Sevilla, M., & Titirici, M.-M. (2016). Fe–N-Doped Carbon Capsules with Outstanding Electrochemical Performance and Stability for the Oxygen Reduction Reaction in Both Acid and Alkaline Conditions. *ACS Nano*, *10*(6), 5922-5932. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b01247

Gao, J., Liu, S., Zhu, P., Zhao, X., & Wang, G. (2020). Fe–N 4 engineering of S and N co-doped hierarchical porous carbon-based electrocatalysts for enhanced oxygen reduction in Zn–air batteries. *Dalton Transactions*, *49*(42), 14847-14853.

Gong, K., Du, F., Xia, Z., Durstock, M., & Dai, L. (2009). Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction. *Science*, *323*(5915), 760-764. https://doi.org/10.1126/science.1168049

Gu, J.-F., Wang, J., Wang, C., Li, J., Chen, C., Zhang, N., Xu, X.-Y., & Chaemchuen, S. (2025). Two-dimensional ZIF-L derived dual Fe/FeNx sites for synergistic efficient oxygen reduction in alkaline and acid media. *Journal of Colloid and Interface Science*, *684*, 159-169.

He, W., Jiang, C., Wang, J., & Lu, L. (2014). High-Rate Oxygen Electroreduction over Graphitic-N Species Exposed on 3D Hierarchically Porous Nitrogen-Doped Carbons. *Angewandte Chemie*, *126*(36), 9657-9661. https://doi.org/10.1002/ange.201404333

Issa, K., Ao, X., Yang, T., Yu, C., Jia, L., Yongmei, C., Yanzhi, S., Xiaojin, Y., & Pingyu, W. (2017). *Hierarchical porous carbon doped with iron/nitrogen/sulfur for efficient oxygen reduction reaction*.

Jeon, I., Zhang, S., Zhang, L., Choi, H., Seo, J., Xia, Z., Dai, L., & Baek, J. (2013). Edge-Selectively Sulfurized Graphene Nanoplatelets as Efficient Metal-Free Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction : The Electron Spin Effect. *Advanced Materials*, *25*(42), 6138-6145. https://doi.org/10.1002/adma.201302753

Jia, Y., Xiong, X., Wang, D., Duan, X., Sun, K., Li, Y., Zheng, L., Lin, W., Dong, M., Zhang, G., Liu, W., & Sun, X. (2020). Atomically Dispersed Fe-N4 Modified with Precisely Located S for Highly Efficient Oxygen Reduction. *Nano-Micro Letters*, *12*(1), 116. https://doi.org/10.1007/s40820-020-00456-8

Jiang, W.-J., Gu, L., Li, L., Zhang, Y., Zhang, X., Zhang, L.-J., Wang, J.-Q., Hu, J.-S., Wei, Z., & Wan, L.-J. (2016). Understanding the High Activity of Fe–N–C Electrocatalysts in Oxygen Reduction : $Fe/Fe_3$ C Nanoparticles Boost the Activity of Fe–N $_x$. *Journal of the American Chemical Society*, *138*(10), 3570-3578. https://doi.org/10.1021/jacs.6b00757

Kim, H., Lee, K., Woo, S. I., & Jung, Y. (2011). On the mechanism of enhanced oxygen reduction reaction in nitrogen-doped graphene nanoribbons. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *13*(39), 17505-17510.

Kong, A., Zhu, X., Han, Z., Yu, Y., Zhang, Y., Dong, B., & Shan, Y. (2014a). Ordered Hierarchically Micro- and Mesoporous Fe–$N_x$-Embedded Graphitic Architectures as Efficient Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. *ACS Catalysis*, *4*(6), 1793-1800. https://doi.org/10.1021/cs401257j

Kong, A., Zhu, X., Han, Z., Yu, Y., Zhang, Y., Dong, B., & Shan, Y. (2014b). Ordered Hierarchically Micro- and Mesoporous Fe–$N_x$-Embedded Graphitic Architectures as Efficient Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. *ACS Catalysis*, *4*(6), 1793-1800. https://doi.org/10.1021/cs401257j

Lai, Q., Su, Q., Gao, Q., Liang, Y., Wang, Y., Yang, Z., Zhang, X., He, J., & Tong, H. (2015). *In Situ* Self-Sacrificed Template Synthesis of Fe-N/G Catalysts for Enhanced Oxygen Reduction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *7*(32), 18170-18178. https://doi.org/10.1021/acsami.5b05834

Li, Y., Gong, M., Liang, Y., Feng, J., Kim, J.-E., Wang, H., Hong, G., Zhang, B., & Dai, H. (2013). Advanced zinc-air batteries based on high-performance hybrid electrocatalysts. *Nature communications*, *4*(1), 1805.

Ma, X.-X., Su, Y., & He, X.-Q. (2017). Fe 9 S 10-decorated N, S co-doped graphene as a new and efficient electrocatalyst for oxygen reduction and oxygen evolution reactions. *Catalysis Science & Technology*, *7*(5), 1181-1192.

Mayrhofer, K. J., & Arenz, M. (2009). Fuel cells : Log on for new catalysts. *Nature Chemistry*, *1*(7), 518.

Wu, B. (2023). *Nitrogen-containing Carbonaceous Materials for Electrochemical Oxygen Reduction Reaction*. Humboldt Universitaet zu Berlin (Germany). https://search.proquest.com/openview/aa3dd4cdc3e3fc23bf089f35ce3a7acc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

Wu, Z., Xu, X., Hu, B., Liang, H., Lin, Y., Chen, L., & Yu, S. (2015a). Iron Carbide Nanoparticles Encapsulated in Mesoporous Fe-N-Doped Carbon Nanofibers for Efficient Electrocatalysis. *Angewandte Chemie International Edition*, *54*(28), 8179-8183. https://doi.org/10.1002/anie.201502173

Wu, Z., Xu, X., Hu, B., Liang, H., Lin, Y., Chen, L., & Yu, S. (2015b). Iron Carbide Nanoparticles Encapsulated in Mesoporous Fe-N-Doped Carbon Nanofibers for Efficient Electrocatalysis. *Angewandte Chemie International Edition*, *54*(28), 8179-8183. https://doi.org/10.1002/anie.201502173

Yang, B., Shen, Y., Peng, J., Liu, W., Gu, T., Yan, T., & Wu, Z. (2025). Precisely designing P-synergized dual-atom Fe sites achieving boosted electrocatalytic oxygen reduction reaction. *Journal of Materials Science & Technology*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030225010710

Zitolo, A., Goellner, V., Armel, V., Sougrati, M.-T., Mineva, T., Stievano, L., Fonda, E., & Jaouen, F. (2015). Identification of catalytic sites for oxygen reduction in iron-and nitrogen-doped graphene materials. *Nature materials*, *14*(9), 937-942.