

Mémoire / Full paper

Étude des interactions intramoléculaires dans les bimétallophthalocyanines par électrochimie et par spectroélectrochimie

Karifa Bayo ^{a,*}, Mabinty Bayo-Bangoura ^a, Mireille Mossoyan-Deneux ^b,
Doris Lexa ^c, Guy Venance Ouedraogo ^a

^a Laboratoire de chimie de coordination, Ufr–Sea, université de Ouagadougou, 09 BP 854 Ouagadougou 09, Burkina Faso

^b Laboratoire « Matériaux et microélectronique de Provence », UMR 6137, case D22, faculté Saint-Jérôme, 13397 Marseille cedex 20, France

^c Laboratoire de bioénergétique et d'ingénierie des protéines, CNRS, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, France

Reçu le 2 décembre 2004 ; accepté après révision le 18 avril 2006

Available online 21 February 2007

Résumé

Nous avons préparé et isolé sous forme solide une série de complexes de la phthalocyanine (Pc) de zinc : ZnPc, F₈ZnPc, biZnPc, F₁₂biZnPc. Ces composés ont été étudiés par voltamétrie cyclique et par spectroélectrochimie. Les résultats mettent en évidence une relation de dépendance entre la structure électronique et la nature des substituants à la périphérie des composés binucléaires.

Pour citer cet article : K. Bayo *et al.*, *C. R. Chimie* 10 (2007).

© 2007 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Abstract

Study of intramolecular interactions in bimetallophthalocyanines by electrochemistry and spectroelectrochemistry. We have prepared and isolated in solid form a series of zinc–phthalocyanine (Pc) complexes (ZnPc, F₈ZnPc, biZnPc, F₁₂biZnPc). These compounds have been studied by means of cyclic voltammetry and spectroelectrochemistry. The results evidence a dependency relation between the electronic structure and the peripheral substituents in the binuclear species. **To cite this article:** K. Bayo *et al.*, *C. R. Chimie* 10 (2007).

© 2007 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Zinc ; Phthalocyanine ; Binucléaire ; Voltamétrie cyclique ; Spectroélectrochimie

Keywords: Zinc; Phthalocyanine; Binuclear; Cyclic voltammetry; Spectroelectrochemistry

1. Introduction

Les métallophthalocyanines (MPc) correspondent à des structures dans lesquelles l'élément métallique est

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : bayo@univ-ouaga.bf (K. Bayo).

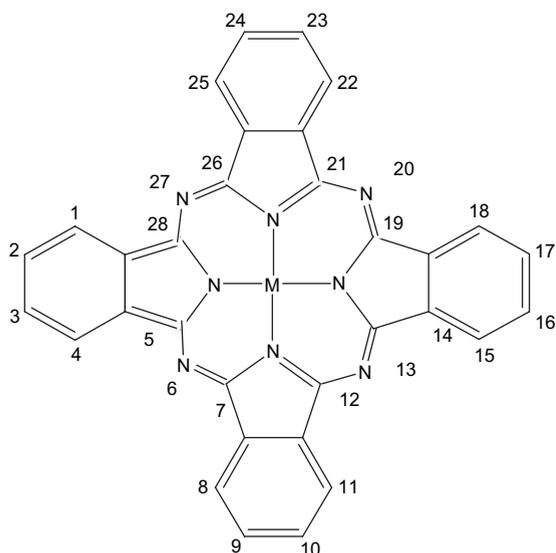


Fig. 1. Métallophthalocyanine (MPc).

lié à un macrocycle (Fig. 1). La délocalisation du système π (18 électrons) sur l'ensemble de la molécule est à l'origine des propriétés optiques remarquables de ces composés. Leur spectre électronique présente des bandes d'absorption très intenses dans le visible, avec des coefficients d'absorption molaires élevés ($\epsilon_{\max} > 10^5 \text{ mol}^{-1} \text{ l cm}^{-1}$) en solution (Fig. 2).

Du fait des propriétés optiques et de l'activité électronique des matériaux correspondants, les métallophthalocyanines ont fait et font toujours l'objet d'un grand nombre de travaux, expérimentaux ou théoriques, pour relier la structure aux propriétés de réactivité ou aux caractéristiques de matériaux actifs en optique ou en électronique. Ainsi, plusieurs types de phthalocyanines ont été préparés et étudiés [1–13].

Les bimétallophthalocyanines, objet de ce travail, sont constituées de deux cycles plans, associés latéralement par un noyau benzénique (Fig. 3). Elles constituent un

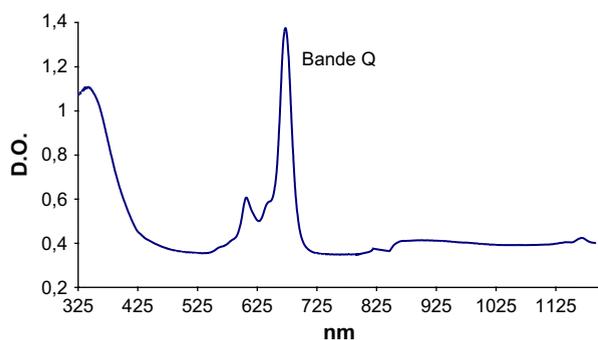


Fig. 2. Spectre UV–visible de ZnPc dans le DMSO.

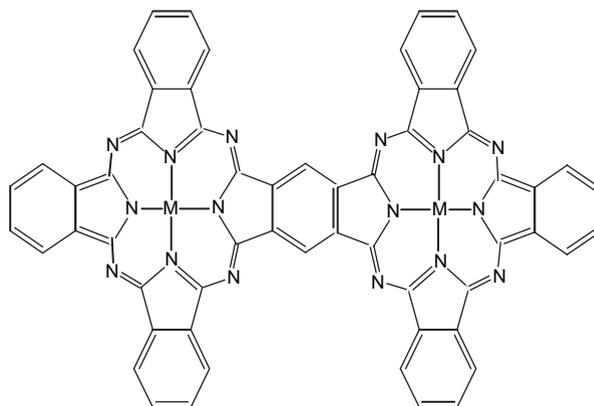


Fig. 3. Bimétallophthalocyanine.

système aromatique étendu, dont les propriétés optiques, magnétiques et catalytiques sont susceptibles d'applications à la fois sous forme de molécules isolées et sous forme de solides organisés ; elles sont thermiquement et photochimiquement stables [14–18].

Toutefois, les travaux publiés à ce jour donnent peu d'information permettant de justifier la structure proposée pour ces composés binucléaires [19–21]. En outre, le comportement électronique de la molécule n'est pas encore définitivement élucidé ; autrement dit, la question est de savoir si les deux cycles se comportent, du point de vue électronique, indépendamment l'un de l'autre [22–26]. À notre connaissance, aucune explication satisfaisante du spectre électronique n'est encore disponible. La bande Q fait toujours l'objet de débat ; les préoccupations des uns et des autres s'articulent autour des questions suivantes (Fig. 4) :

- pourquoi la bande Q ne subit-elle pas un déplacement significatif dans le rouge ?
- quelle est l'origine de sa deuxième composante (autour de 700 nm) ?

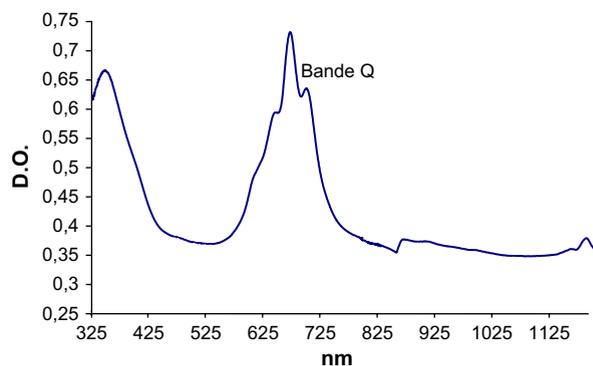


Fig. 4. Spectre UV–visible de biZnPc dans le DMSO.

Nos travaux antérieurs nous ont permis d'apporter quelques éléments de réponse aux différents points évoqués ci-dessus [27,28]. Le présent travail vise à apporter une nouvelle contribution à la résolution du problème de la délocalisation des électrons π sur l'ensemble de la molécule.

Dans cet article, nous présentons et discutons les résultats que nous avons obtenus dans le cadre de la préparation et de l'étude des composés ZnPc, F₈ZnPc, biZnPc, F₁₂biZnPc par électrochimie et par spectroélectrochimie.

2. Partie expérimentale

Les réactifs, d'origines Acros, Merck et Labosi, de pureté commerciale, ont été utilisés sans purification supplémentaire.

2.1. Électrochimie

Les voltamogrammes cycliques ont été enregistrés à l'aide un potentiostat/galvanostat modèle 263 A (PAR) commandé par un programmeur universel PAR 175 (Princeton Applied Research Corp.). La cellule, en verre inactinide, est thermostatée.

L'électrode de travail, fabriquée au laboratoire, est un disque de platine de section $s = 0,12 \text{ cm}^2$. Cette électrode est polie successivement avec des pâtes de diamant de grades 6, 3 et 1 μm , jusqu'à ce que obtention d'une surface réfléchissante. Entre deux polissages, la surface de l'électrode est nettoyée aux ultrasons dans un bain d'alcool éthylique absolu pendant 2 min, puis séchée.

L'électrode de référence est une électrode Ag/Ag⁺ dont le potentiel par rapport à l'électrode à hydrogène est 0,206 V.

Un barbotage de 30 min sous courant d'argon permet d'éliminer toute trace d'oxygène dans les solutions. Les expériences sont faites à 25 °C.

Nous avons travaillé dans le DMSO en présence d'hexafluorophosphate de tétrabutylammonium, utilisé comme électrolyte support à une concentration de 10^{-1} M .

2.2. Spectroélectrochimie

En spectroélectrochimie, les spectres électroniques ont été enregistrés avec un spectromètre Cary/5E/UV–vis–NIR, couplé à un ordinateur HP Vectra 486/252 VL.

La cellule de mesure, fabriquée au laboratoire, est en quartz et se compose de deux parties : la partie supérieure comporte les dispositifs prévus pour l'introduction

des électrodes, la solution, l'arrivée et l'évacuation du gaz inerte : la partie inférieure consiste en une cellule de 0,5 mm d'épaisseur, dans laquelle vont s'effectuer les différents transferts d'électrons.

L'électrode de travail est une grille de platine logée dans la partie inférieure de la cellule. L'électrode de référence est celle utilisée en électrochimie ; les mesures sont faites à l'abri de la lumière.

2.3. Préparation des composés

2.3.1. ZnPc

Un mélange de phtalonitrile (4,3 g, 33 mmol) et d'acétate de zinc (2,5 g, 114 mmol) est porté à reflux dans le nitrobenzène. Après 10 min de chauffage, la solution vire au vert. Cette couleur persiste quelques instants ; une substance violette précipite.

On maintient le reflux pendant 4 h ; on filtre et on lave à l'éthanol et à l'acétone. Le solide obtenu se présente sous la forme d'une poudre de couleur violette.

La purification du composé se fait par lavages successifs au Soxhlet avec du toluène, de l'éthanol et, enfin, de l'acétone. Le solide est ensuite traité à chaud dans une solution aqueuse de HCl à 10%, puis dans une solution aqueuse de soude à 10%. On obtient 4 g de produit [8,4 mmol ; rendement (rdt) = 82,5%].

2.3.2. F₈ZnPc (2,3,9,10,16,17,23,24-octafluorophthalocyanine de zinc)

Dans un récipient monocol de 500 ml, on introduit successivement 1 g (5,4 mmol) de 4,5-difluoro anhydride phtalique, 298 mg (1 mmol) d'acétate de zinc, 3 g (50 mmol) d'urée et un sel de molybdène, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O. Le mélange est porté à reflux dans le nitrobenzène.

Après 20 min de chauffage, la solution prend une coloration verte, qui persiste avec le temps ; le reflux dure 7 h. On filtre et on obtient un composé solide de couleur violet sombre.

Le solide ainsi obtenu est traité à chaud dans une solution de HCl à 5%. Filtré à chaud, il est abondamment lavé à l'eau distillée jusqu'à élimination totale de l'acide, puis à l'acétone. Cette étape permet d'éliminer l'excès d'urée et les cations métalliques libres (Zn²⁺, Mo^{VI}). Le produit est agité dans le toluène pendant 24 h afin d'éliminer les impuretés organiques (excès de 4,5-difluoro anhydride phtalique). Après avoir éliminé le toluène, le traitement se poursuit avec une solution diluée de soude ; filtré, le solide obtenu est lavé d'abord à l'eau jusqu'à l'élimination complète de la base, puis à l'acétone. On obtient 800 mg de produit (rdt : 1,1 mmol, 82%).

2.3.3. *biZnPc*

On porte à reflux, dans le nitrobenzène, un mélange de 10 g (66 mmol) d'anhydride phtalique, 2,46 g (11,26 mmol) de 1,2,4,5-tétracarboxylique dianhydride benzène, 7,46 g (22,52 mmol) d'acétate de zinc, 19 g (317 mmol) d'urée et 0,64 g d'un sel de molybdène. Après une vingtaine de minutes de chauffage, la solution prend une coloration verte, qui persiste avec le temps. Le chauffage dure 7 h.

Le solide obtenu est traité à chaud avec une solution aqueuse de HCl à 20%. Filtré à chaud, le composé est lavé à l'eau distillée jusqu'à élimination totale de l'acide. Le traitement se poursuit avec une solution diluée de NaOH (environ 0,05 M). Le produit ainsi obtenu est lavé au méthanol et à l'éthanol, puis séché.

La purification se poursuit en utilisant, d'une part, la chromatographie sur colonne et, d'autre part, un procédé d'extraction par petites fractions successives de l'espèce la plus soluble.

2.3.3.1. Chromatographie sur colonne. On introduit 100 mg (92,8 mmol) de composé sur une colonne de 2 cm de diamètre et 25 cm de long ; le support utilisé est l'alumine neutre et l'éluant est du diméthylformamide.

Après 72 heures de manipulation, on isole un premier produit de couleur bleue ; le spectre UV–visible de celui-ci est parfaitement superposable à celui de ZnPc. Quatre-vingt-seize heures plus tard, on récupère un second produit, qui est de couleur verte. Le spectre UV–visible de ce dernier est identique à celui de *biZnPc*, publié dans la littérature [19].

Cette technique est lente et onéreuse, et aboutit à des quantités très faibles de produit (10 mg, 9,2 mmol, 0,08%).

2.3.3.2. La technique des extractions successives. Cette technique est basée sur le fait que, dans un solvant donné, le composé mononucléaire est plus soluble que le composé binucléaire ; ainsi, en procédant par une extraction répétée avec de petites quantités de solvant, on peut éliminer l'espèce mononucléaire du produit de synthèse.

Nous avons utilisé comme solvant un mélange de CH_2Cl_2 et de DMF dans les proportions 9:1 ; l'opération est suivie par spectrométries IR et UV–visible.

Les résultats sont reproductibles, avec un meilleur rendement que dans le cas précédent (900 mg de *biZnPc*, 92 mmol, 0,8%).

2.3.4. *F₁₂biZnPc*

Ce composé est obtenu suivant le même protocole que *biZnPc*, à partir du 4,5-difluoro anhydride phtalique, avec un rendement de 71%.

Tous les composés ont été identifiés par spectrométries IR et UV–visible.

3. Résultats et discussion

L'étude expérimentale des composés a été organisée de la façon suivante : dans une première étape, nous déterminons par électrochimie les premiers potentiels de réduction des composés. Dans une seconde étape, pour chaque composé, nous nous plaçons à chaque potentiel de réduction et nous enregistrons le spectre UV–visible toutes les 5 min. Nous déterminons ainsi la courbe caractéristique de l'espèce formée à chaque potentiel. La comparaison des spectres des espèces mononucléaires avec ceux des binucléaires peut fournir des indications quant à la nature de ces derniers aux différents potentiels.

3.1. Electrochimie

Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le Tableau 1.

Les résultats de ces mesures permettent de confirmer certaines données de la littérature aussi bien pour les composés mononucléaires que les binucléaires. Cependant les résultats obtenus avec $\text{F}_{12}\text{biZnPc}$ sont difficiles à interpréter.

En effet, dans le composé mononucléaire, l'introduction des atomes de fluor facilite la réduction du macrocycle. Ce phénomène s'explique, d'une part, par l'effet électro-attracteur des atomes de fluor et d'autre part, par le fait que les substitutions à la périphérie influencent essentiellement les niveaux d'énergie du macrocycle [29].

Dans les espèces binucléaires que nous avons étudiées, les résultats ne permettent pas d'apprécier, d'une part, l'ampleur de la délocalisation des électrons π et d'autre part, l'influence des atomes de fluor.

Le premier potentiel de réduction de *biZnPc* est plus élevé que celui de ZnPc. Des travaux effectués par différents auteurs sur des complexes de la phtalocyanine de zinc (mononucléaires et binucléaires substituées à la périphérie) les ont conduits à ce résultat [23]. Ils expliquent ce phénomène par une importante délocalisation du système π sur l'ensemble de la molécule, qui

Tableau 1
Valeur des premiers potentiels de réduction (réf. Ag/AgNO₃)

ZnPc (10^{-3} M)	-1,083 V	-1,552 V	
ZnPcF ₈ (10^{-3} M)	-0,949 V	-1,316 V	
<i>biZnPc</i> (10^{-3} M)	-0,933 V	-1,072 V	-1,714 V
$\text{F}_{12}\text{biZnPc}$ (10^{-3} M)	-1,003 V	-1,297 V	-1,726 V

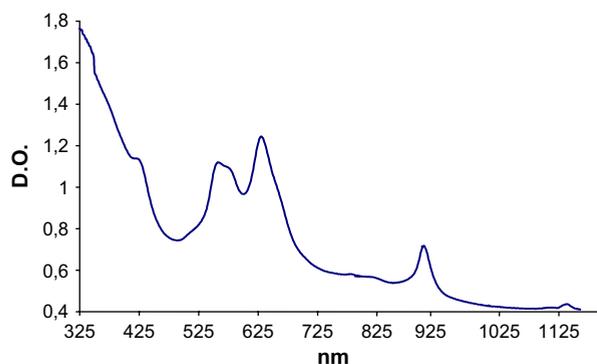


Fig. 5. Spectre UV-visible de ZnPc(-1) dans le DMSO.

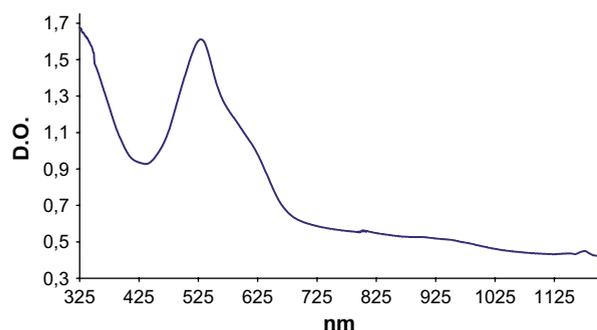


Fig. 6. Spectre UV-visible de ZnPc(-2) dans le DMSO.

aurait pour effet d'abaisser l'énergie des premiers transferts d'électrons.

La technique employée ne donne aucune indication sur la nature des espèces obtenues à chaque potentiel ; l'appréciation des résultats peut être aléatoire et aboutir à des conclusions erronées, ce qui justifie l'étude spectroélectrochimique.

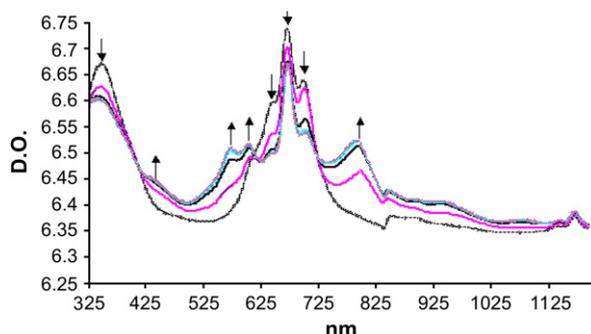
3.2. Spectroélectrochimie

Pour les espèces mononucléaires (ZnPc ; 4,5-ZnPcF₈), ces mesures nous ont permis d'obtenir les spectres caractéristiques aux degrés d'oxydation 0, -1, -2, (Figs. 5 et 6). Aux degrés d'oxydation -1 et -2, les spectres de ZnPc et de 4,5-ZnPcF₈ ont les mêmes allures.

Tableau 2

Longueurs d'onde des maxima (nm) des bandes remarquables

BiZnPc	340	603	640	668	692			
BiZnPc(-0,9 V)	340	425	566	597	637	670	695	786
ZnPc(-1)	—	412	550	570	652			

Fig. 7. Courbes de réduction de biZnPc (10⁻⁴ M) dans le DMSO à -0,9 V.

Les mesures ont été faites à -1,3 et -1,8 V pour ZnPc et à -1,15 et -1,7 V pour 4,5-ZnPcF₈. Ces spectres nous serviront d'éléments de référence pour l'étude des composés binucléaires.

3.2.1. biZnPc

Le spectre obtenu au potentiel de la première vague cathodique (-0,9 V) contient toutes les bandes de transition de biZnPc. De nouvelles bandes de transition apparaissent à 425, 566 et à 637 nm ; ces bandes sont comparables à celles observées sur le spectre de ZnPc(-1) (Tableau 2, Fig. 7).

La bande de transition à 786 nm peut être propre à l'espèce formée.

Quant au spectre obtenu à -1,1 V, il contient lui aussi deux bandes de transition (670 nm, 638 nm) observables dans le spectre de biZnPc. Y apparaissent également les bandes de transition à 425 nm et 638 nm déjà observées dans le spectre obtenu à -0,9 V. Une nouvelle bande de transition, comparable à la principale bande de transition de ZnPc(-2) est observée à 520 nm (Tableau 3, Fig. 8).

Tableau 3

Longueurs d'ondes des maxima (nm) des bandes remarquables

BiZnPc	340			603		640	668	692		
BiZnPc(-0,9 V)	340	425		556	597	637	670	695	786	
BiZnPc(-1,1 V)	346(e)	420	520	568		638	670		712	790
ZnPc(-2)	—		522			617(e)				

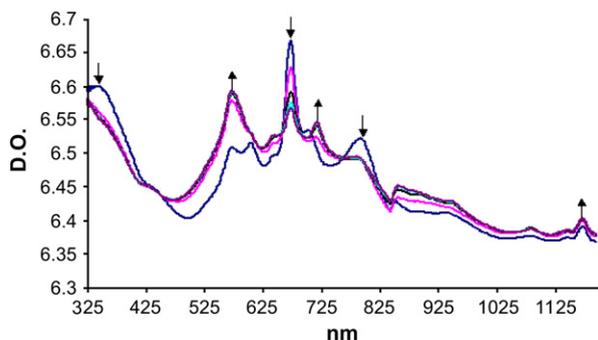


Fig. 8. Courbes de réduction de biZnPc (10^{-4} M) dans le DMSO à $-1,1$ V.

3.2.2. $F_{12}biZnPc$

Le spectre obtenu au niveau de la première vague de réduction ($-1,15$ V) est quasi identique à celui de 4,5-ZnPcF₈(-1) ; les principales bandes de transition de $F_{12}biZnPc$ ont disparu (Tableau 4, Fig. 9).

Le spectre obtenu à $-1,5$ V, seconde vague cathodique de réduction, est quasi identique à celui de 4,5-ZnPcF₈(-2). La seule différence observable entre les deux spectres est l'apparition d'une nouvelle bande de transition à 712 nm ; elle peut être liée à l'espèce formée à ce potentiel (Tableau 5, Fig. 10).

Les mesures effectuées nous ont permis d'obtenir les courbes caractéristiques des espèces formées à différents potentiels, que nous avons déterminés par

Tableau 4
Longueurs d'onde des maxima (nm) des bandes remarquables

$F_{12}biZnPc$	335	—	—	625	650
$F_{12}biZnPc(-1,15$ V)	—	557	557	570	625
4,5-ZnPcF ₈ (-1)	—	420	550	568	625

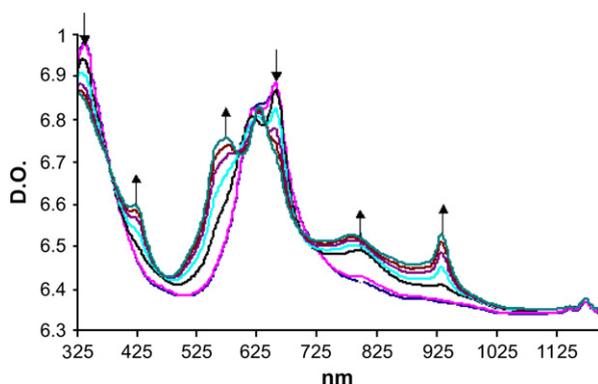


Fig. 9. Courbes de réduction de $F_{12}biZnPc$ (5×10^{-4} M) dans le DMSO à $-1,15$ V.

Tableau 5
Longueurs d'onde des maxima (nm) des bandes remarquables

$F_{12}biZnPc(-1,15$ V)	—	417	—	557	568	625	932
$F_{12}bibiZnPc(-1,5$ V)	346(e)	—	520	—	618(e)	712	—
4,5-ZnPcF ₈ (-2)	—	—	520	—	618(e)	—	—

électrochimie. L'analyse de ces courbes nous permet de suivre l'évolution de nos échantillons consécutivement aux différents transferts d'électrons.

Dans les composés mononucléaires, l'introduction des atomes de fluor à la périphérie n'a d'autre effet que le déplacement des potentiels de réduction. Ceci confirme les résultats d'électrochimie et même ceux obtenus en UV-visible [28] ; les atomes de fluor provoquent un mouvement isochrome des principales bandes de transition de ZnPc.

L'analyse du spectre obtenu avec biZnPc après la première vague ($-0,9$ V) fait apparaître une coexistence des bandes de biZnPc et celles caractéristiques de ZnPc(-1). Ce résultat peut traduire le fait que, consécutivement aux échanges électroniques réalisés dans la première vague, l'espèce formée est un système dont l'un des cycles se trouve à l'état d'oxydation zéro, tandis que l'autre est à l'état -1 . Il traduirait ainsi un échange monoélectronique. Dans le spectre obtenu à $-1,1$ V, on observe aussi bien les bandes caractéristiques de ZnPc(-1) que celles de ZnPc(-2). Ce spectre peut être attribué à un composé binucléaire où l'un des cycles est à l'état d'oxydation (-1), tandis que l'autre est à l'état d'oxydation (-2). La formation de ces espèces peut être interprétée comme la conséquence d'une interaction forte entre les deux cycles, ce qui confirme ainsi certaines hypothèses de la littérature [23,25].

Les résultats obtenus avec $F_{12}biZnPc$ mettent en évidence un fonctionnement électronique totalement

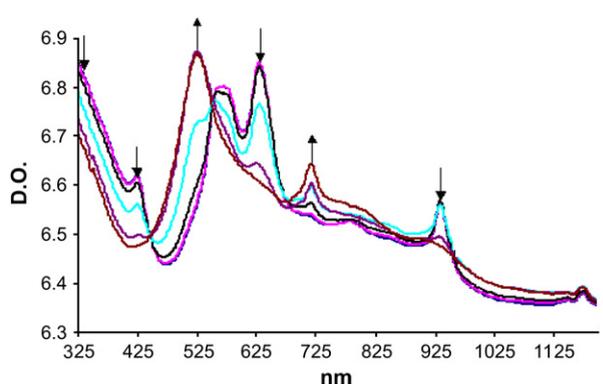


Fig. 10. Courbes de réduction de $F_{12}biZnPc$ (5×10^{-4} M) dans le DMSO à $-1,5$ V.

indépendant des deux cycles constituant ce composé. Ainsi, le spectre de l'espèce formée après les premiers échanges électroniques est identique à celui de $\text{ZnPcF}_8(-1)$. Il traduit une situation où chaque cycle est à l'état d'oxydation (-1) . Celui obtenu avec la deuxième espèce formée présente essentiellement les bandes caractéristiques de $4,5\text{-ZnPcF}_8(-2)$; chaque cycle est à l'état d'oxydation (-2) .

L'adjonction de ces nouvelles données aux résultats de la littérature permet de conclure que l'importance des interactions intramoléculaires est liée à la nature des substituants à la périphérie. Ceci confirme nos résultats, aussi bien en RMN ^1H qu'en UV-visible ou en IR [27,28].

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons préparé et isolé sous forme solide les complexes ZnPc , ZnPcF_8 , biZnPc et $\text{F}_{12}\text{biZnPc}$. Les composés fluorés sont beaucoup plus solubles que les non fluorés.

La voltamétrie cyclique nous a permis de déterminer les premiers potentiels de réduction et de mettre en évidence l'influence des atomes de fluor sur ceux-ci. Dans les composés mononucléaires, l'introduction de ces derniers à la périphérie facilite la réduction du macrocycle.

En spectroélectrochimie, nous avons déterminé la nature des espèces formées aux différents potentiels d'échanges électroniques. L'analyse des résultats obtenus met en évidence le fait que l'importance des interactions intramoléculaires des composés binucléaires dépend de la nature des substituants à la périphérie.

Références

- [1] J.E. Bloor, C.C. Walden, A. Demerdache, J. Schlabit, *Can. J. Chem.* 42 (1964) 2201.
- [2] S.I. Yang, J. Li, H.S. Cho, D. Kim, D.F. Bocian, D. Holten, J.S. Lindsey, *J. Mater. Chem.* 10 (2000) 283.
- [3] B. Schöllorn, J.-P. Germain, A. Puly, C. Maleysson, J.-P. Blanc, *Thin Solid Films* 326 (1998) 245.
- [4] T.J. Marks, D.R. Stojakovic, *J. Am. Chem. Soc.* 100 (1978) 1695.
- [5] V.W. Day, T.J. Marks, W.A. Wachter, *J. Am. Chem. Soc.* 97 (1975) 4549.
- [6] V. Meller, A. Ossko, *Monatsh. Chem.* 103 (1972) 150.
- [7] G. Rojo, A. Hierro, M.A. Diaz-Garcia, F. Agullo-López, B. Del Rey, A. Sastre, T. Torres, *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 1802.
- [8] N. Kobayashi, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* (1991) 1203.
- [9] K.S. Murray, *Coord. Chem. Rev.* 12 (1974) 1.
- [10] S.J. Lippard, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* 27 (1988) 344.
- [11] B.O. West, *Polyhedron* 8 (1989) 219.
- [12] B. Moubaraki, D. Benlian, A. Baldy, M. Pierrot, *Acta Crystallogr. C* 45 (1989) 393.
- [13] K. Benihya, thèse, université de Provence (Aix-Marseille-1), septembre 1999.
- [14] J.P. Collman, T.R. Halpert, K.S. Suslick, in : T.G. Spiro (Ed.), *Metal Ion Activation of Dioxygen*, J. Wiley and Sons, Inc., New York, 1980, p. 1.
- [15] D.F. Bocian, E.W. Findsen, J.A. Hoffman Jr., G.A. Schick, D.R. English, D.N. Hendrickson, S. Suslick, *Inorg. Chem.* 23 (1984) 807.
- [16] D.R. English, D.N. Hendrickson, S. Suslick, *Inorg. Chem.* 24 (1984) 122.
- [17] M.A. Abd El-Ghaffar, M.A. Ahmed, M.S. Rizk, *J. Indian Chem. Soc.* LX (June 1983) 550.
- [18] M.A. Abd El-Ghaffar, E. El Shereafy, *Thermochim. Acta* 178 (1991) 257.
- [19] E. Elshereafy, M.A. Abd El-Chaffar, *Thermochim. Acta* 186 (1991) 179.
- [20] M.A. Abd El-Ghaffar, A.F. Youman, A.A. Yehia, *J. Pigment Resin Technol.* (December 1987) 10.
- [21] M.A. Abd El-Ghaffar, I.A. Sabbah, M. Moustapha, A.A. Salman, *J. Pigment Resin Technol.* (May 1988) 4.
- [22] E.S. Dodsworth, A.B.P. Lever, P. Seymour, C.C. Leznoff, *J. Phys. Chem.* 89 (1985) 5698.
- [23] C.C. Leznoff, H. Lam, S.M. Marcuccio, W.A. Nevin, P. Janda, N. Kobayashi, A.B.P. Lever, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* (1987) 699.
- [24] J. Yang, M.R. Van De Mark, *Tetrahedron Lett.* 34 (1993) 5223.
- [25] N. Kobayashi, H. Lam, W.A. Levin, P. Janda, C.C. Leznoff, T. Koyama, A. Monden, H. Shirai, *J. Am. Chem. Soc.* 116 (1994) 879.
- [26] K. Ishii, N. Kobayashi, Y. Higashi, T. Osa, D. Lelièvre, J. Simon, S. Yamauchi, *Chem. Commun.* (1999) 969.
- [27] K. Bayo, G.V. Ouedraogo, K. Benihya, G. Terzian, J.-C. Mossoyan, *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.* 15 (2003) 1.
- [28] K. Bayo, J.C. Mossoyan, G.V. Ouedraogo, *Spectrochim. Acta, Part A* 60 (2004) 653.
- [29] C. Fierro, A.B. Anderson, D.A. Sherson, *J. Phys. Chem.* 92 (1988) 6902.