

Les hétéroéléments, des outils de choix pour l'étude des surfaces de potentiel

Exemple de la combinaison phosphore/bore et des diradicaux-1,3

Didier Bourissou

Résumé	La stabilisation des espèces transitoires constitue un défi particulièrement stimulant pour le chimiste de synthèse et une source d'informations très riche. Les différentes approches utilisées pour caractériser, voire isoler, de telles espèces sont présentées dans le cas des carbocations. L'exemple particulier des diradicaux-1,3 sera ensuite détaillé en soulignant l'intérêt des hétéroéléments, et notamment de la combinaison phosphore/bore.
Mots-clés	Espèces hautement réactives, stabilisation, hétéroéléments, radicaux libres, diradicaux.
Abstract	Heteroelements, useful tools for the study of potential surfaces: the example of the phosphorus/boron combination and 1,3-diradicals The stabilisation of transient species is not only a stimulating challenge for synthetic chemists but also a valuable source of informations. The various approaches used to characterize, or even isolate, such species are presented for carbocations. The example of 1,3-diradicals is then detailed, highlighting the interest of heteroelements, and more particularly of the phosphorus/boron combination.
Keywords	Highly reactive species, stabilisation, heteroelements, free radicals, diradicals.

La stabilisation d'espèces hautement réactives : pourquoi et comment ?

Quels que soient leurs objectifs spécifiques, les chimistes de synthèse attachent une importance particulière aux espèces transitoires mises en jeu dans les transformations qu'ils réalisent. D'un point de vue fondamental, les intermédiaires réactionnels et états de transition sont typiquement les points des surfaces de potentiels où des liaisons chimiques se créent et d'autres se cassent. C'est donc dans ces espèces que des modes de liaison originaux sont susceptibles d'être mis en jeu. En chimie organique par exemple, c'est à ce niveau que la règle de l'octet peut ne pas être respectée. Obtenir des informations précises sur les intermédiaires réactionnels et états de transition revêt une importance cruciale, notamment quand des problèmes de sélectivité (qu'elle soit de nature chimio, régio ou stéréo) interviennent. Dans cette optique, la stabilisation des espèces transitoires permet de mieux appréhender leur structure électronique et leur réactivité.

La stabilisation d'une espèce hautement réactive suppose de ralentir ses processus d'évolution, et plusieurs approches peuvent être mises en œuvre à cet effet. Les plus couramment utilisées seront présentées brièvement et illustrées par quelques exemples concernant la stabilisation de carbocations [1]. En pratique, on peut distinguer deux « écoles » qui travaillent respectivement sur le milieu réactionnel dans lequel les espèces sont étudiées et sur la structure même des espèces transitoires.

La première « école » joue donc sur le milieu environnant pour isoler chimiquement l'espèce en question et obtenir ses

caractéristiques spectroscopiques. A titre d'exemple, la génération des espèces hautement réactives en phase gazeuse couplée à l'utilisation de la spectrométrie de masse est une méthode particulièrement adaptée à la détection des espèces chargées et à l'étude de leur réactivité. De façon un peu similaire, l'utilisation de matrices de gaz inerte* couplée à la spectroscopie infrarouge constitue une méthode de choix pour la caractérisation de telles espèces en phase condensée. Ces deux méthodes ont par exemple été mises à profit pour obtenir les premières données physico-chimiques sur le cation phényle, carbocation particulièrement réactif dont la formation transitoire est généralement postulée

Glossaire

Les mots suivis d'un astérisque* sont définis ci-dessous.

Isolobalité : concept introduit par Roald Hofmann pour qualifier des groupements possédant des orbitales de nombre, d'occupation, de symétrie et d'énergie identiques (voir sa « Nobel Lecture » dans *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1982**, 21, p. 711).

Isomères de valence : isomères de constitution reliés entre eux par des réactions péricycliques.

Matrice de gaz inerte : matrice solide constituée d'un gaz inerte (argon, néon, krypton, xénon ou diazote) refroidi à très basse température (typiquement quelques K).

Super-acide : composé ou mélange de composés plus acide que l'acide sulfurique pur (voir Olah G.A., Prakash G.K.S., Goepfert A., *L'Act. Chim.*, oct-nov. **2006**, 301-302, p. 68).

Système parent : composé modèle dont les substituants sont remplacés par des atomes d'hydrogène.

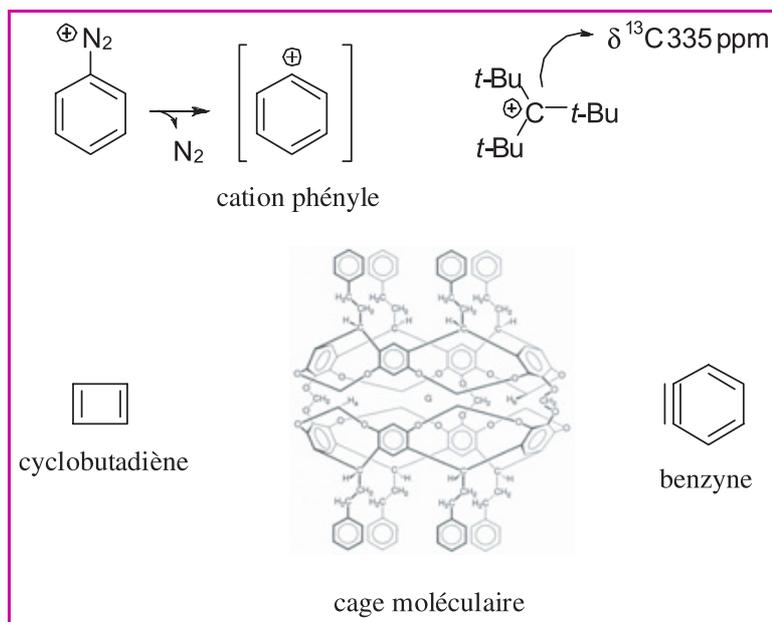


Figure 1 - Exemples d'espèces transitoires stabilisées de façon « externe ».

à partir du sel de diazonium correspondant (figure 1) [2-3]. Dans ce domaine, on peut également citer l'utilisation de cages moléculaires capables de piéger en leur sein de petites molécules (telles que le cyclobutadiène ou le benzyne) qui sont ainsi stabilisées par confinement [4-5]. L'exemple des carbocations illustre enfin le rôle crucial du solvant dans lequel de telles espèces sont étudiées. Olah et coll. ont en effet montré que de telles espèces électro-déficientes peuvent être générées et caractérisées spectroscopiquement dans des milieux super-acides* tels que $\text{SbF}_5/\text{SO}_2\text{ClF}$ ou $\text{SbF}_5/\text{HSO}_3\text{F}$ [6]. Ainsi a-t-il été montré que le carbone central du carbocation $(t\text{-Bu})_3\text{C}^+$ présentait un déplacement chimique en RMN du carbone 13 ($\delta = 335$ ppm) bien supérieur à ceux observés pour la plupart des dérivés organiques (0-200 ppm).

Si cette stabilisation « externe » des espèces hautement réactives s'adresse aux espèces transitoires elles-mêmes, elle nécessite des techniques relativement sophistiquées. D'où l'approche complémentaire mise en œuvre par la deuxième « école » qui consiste à stabiliser les composés cibles en modifiant leur structure. Il est important de souligner à ce stade que les variations structurales seront susceptibles de perturber la structure électronique et donc la réactivité de l'espèce que l'on cherche à stabiliser. Par conséquent, une étape importante du travail consistera ici à préciser le rôle et l'influence des modifications structurales apportées au squelette initial.

Une première possibilité consiste à introduire des groupements stériquement encombrants (tels que des noyaux aromatiques orthosubstitués) qui protègent « cinétiquement » ces espèces en empêchant l'approche de tout réactif (figure 2). De façon complémentaire, des substituants électriquement actifs (par effet mésomère en particulier) peuvent être utilisés. Les iminiums et le triphénylcarbénium constituent des exemples de choix d'une telle stabilisation (figure 3). La participation de la paire libre de l'azote dans le premier cas et des nuages π des systèmes aromatiques dans le second est telle que ces carbocations peuvent être manipulés dans les solvants organiques classiques et à température

ambiante. On peut également bénéficier d'une stabilisation « électronique » importante en incorporant le centre réactif dans un système aromatique. A cet égard, Breslow et coll. ont reconnu dès 1957 la stabilité particulière dont jouissent les cyclopropéniums, prototypes des systèmes aromatiques à deux électrons π [7-8]. Notons à nouveau qu'une forte stabilisation peut considérablement perturber la réactivité de l'espèce en question. Ainsi, la combinaison du caractère aromatique du cyclopropénium et de groupements amino π -donneurs conduit-elle à des espèces dont le caractère électrophile est considérablement diminué, au point qu'elles deviennent stables dans l'eau [9] !

Une autre stratégie consiste à utiliser des hétéroéléments, et notamment les éléments des groupes 13 à 15 dont les propriétés spécifiques peuvent être mises à profit. Les éléments tels que le phosphore ou le silicium se distinguent en effet du carbone par un caractère électropositif, une taille importante, la formation de liaisons π faibles, la faible tendance à l'hybridation s/p, la capacité à atteindre des valences élevées... [10]. Ces hétéroéléments peuvent être impliqués au sein de substituants électriquement actifs, comme dans le cas des ylures de phosphonium

ou réactifs de Wittig [11] qui sont stabilisés par délocalisation de la paire libre du carbone sur le phosphore (figure 4). Une alternative consiste à incorporer directement les hétéroéléments au sein du motif que l'on cherche à stabiliser.

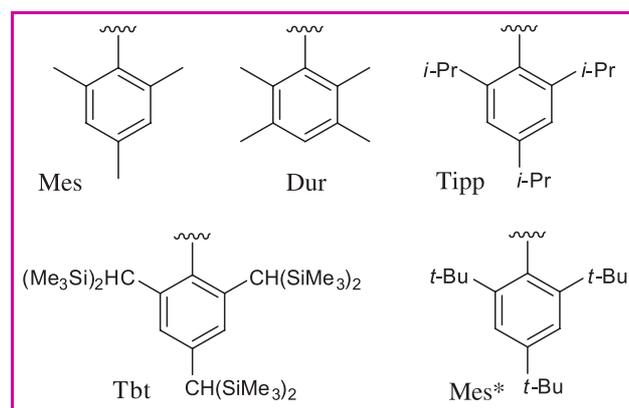


Figure 2 - Exemples de substituants stériquement protecteurs.

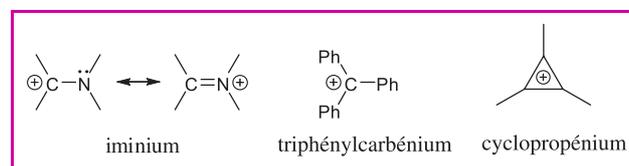


Figure 3 - Structure des iminiums, du triphénylcarbénium et des cyclopropéniums.

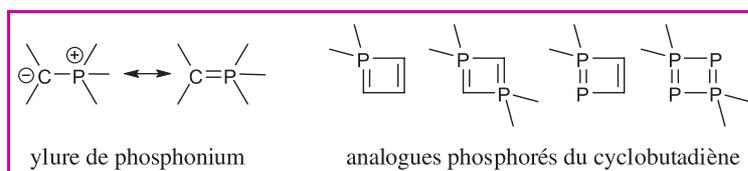


Figure 4 - Structure des ylures de phosphonium et des analogues phosphorés du cyclobutadiène.

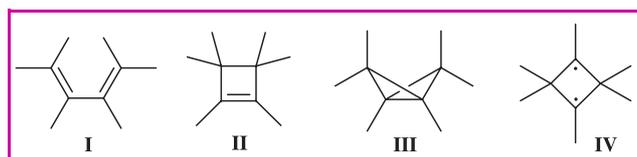


Figure 5 - Isomères de valence du buta-1,3-diène.

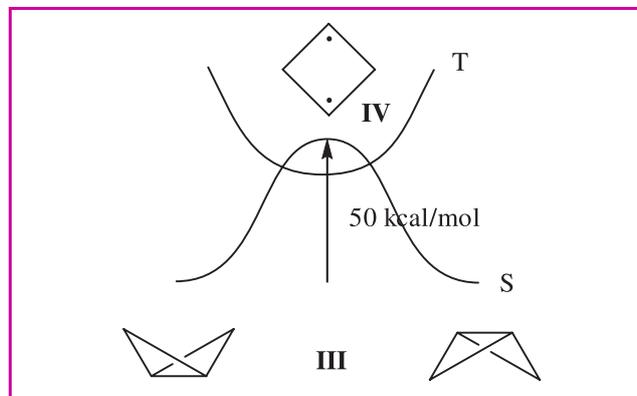


Figure 6 - Surface de potentiel du diradical-1,3 IV.

Une telle approche a par exemple été mise en œuvre pour accéder à une série d'analogues phosphorés stables du cyclobutadiène [12].

Dans la suite de cet article, cette approche qui consiste à stabiliser des espèces transitoires en substituant les centres carbonés hautement réactifs par des hétéroéléments sera détaillée dans le cas particulier des diradicaux-1,3. L'intérêt de la combinaison phosphore/bore pour la stabilisation de telles espèces sera présenté et une attention particulière sera dédiée à la complémentarité des études expérimentales et théoriques.

Les diradicaux-1,3, des espèces très fugaces

Les buta-1,3-diènes **I**, synthons bien connus des chimistes organiciens, possèdent trois isomères de valence* cycliques : les cyclobutènes **II**, les bicyclo[1.1.0]butanes **III** et les cyclobutane-1,3-diyles **IV** (figure 5).

De par la juxtaposition de deux centres radicalaires très réactifs, les diradicaux **IV** sont des espèces très fugaces, qui n'ont été caractérisées qu'en matrice à très basse température [13]. Pour le système parent*, l'état fondamental est triplet (T) et l'état singulet (S) n'est même pas un minimum sur la surface de potentiel (figure 6). C'est en fait l'état de transition pour l'inversion des bicyclobutanes **III** [14], le diradical singulet **IV** résultant formellement du clivage homolytique de la liaison endocyclique de **III**.

Récemment, il a été montré avec le composé **1** que l'incorporation de groupes électro-négatifs (tels que des éthoxy) entre les deux centres radicalaires permettait une interaction des deux électrons non liants à travers les liaisons, mettant en jeu une combinaison d'orbitales $\sigma^*_{(C-O)}$ accessibles en énergie (figure 7). Cette interaction a pour effet de stabiliser l'état singulet qui devient « observable » mais dont la durée de vie reste extrêmement courte, de l'ordre de la μs à température ambiante pour **1** [15]. Une autre approche pour stabiliser les diradicaux-1,3 consiste à incorporer des

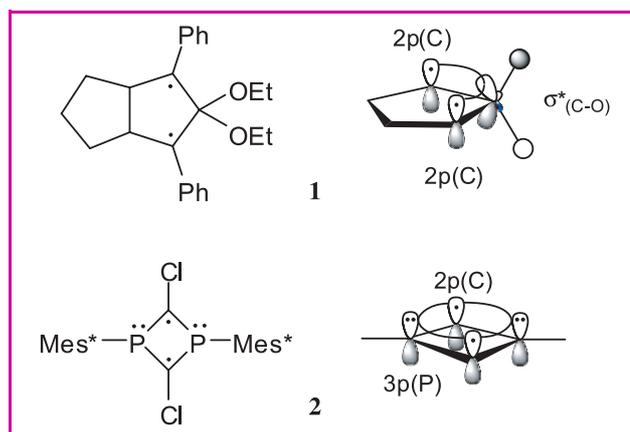


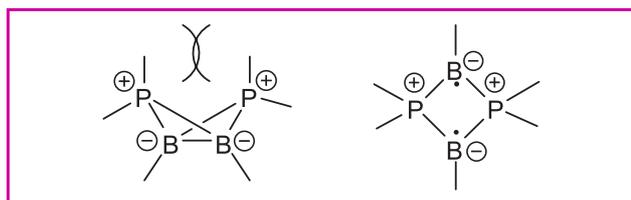
Figure 7 - Stabilisation de diradicaux-1,3 à l'état singulet.

hétéroéléments dans le cycle lui-même. Niecke et coll. ont par exemple remplacé les deux fragments (CR_2) du diradical **IV** par des groupes phosphorés (PR) [16]. Les diradicaux **2** ainsi obtenus possèdent six électrons π délocalisés sur quatre centres. Ils bénéficient donc d'un certain caractère aromatique et sont stables à température ambiante.

Pour notre part, nous avons décidé d'étudier des systèmes « mixtes » à base de phosphore et de bore. Ces deux éléments sont en quelque sorte « symétriques » par rapport au carbone (le bore possède un électron de valence de moins que le carbone alors que le phosphore en comporte un de plus). Ils possèdent des électronégativités très semblables ($\chi_B = 2,0$ et $\chi_P = 2,1$), ce qui permet d'envisager une certaine synergie. Nous avons donc choisi de remplacer les fragments (CR) et (CR_2) des systèmes **III** et **IV** par les fragments borés (BR^*) et phosphorés (PR_2^+) isolobaux* (figure 8). Les systèmes ainsi obtenus restent électriquement neutres. Comme dans les systèmes carbonés, les contraintes stériques ne sont pas en faveur de la forme bicyclique (tension de cycle, interactions 1,3-diaxiales). La structure diradicalaire à base de phosphore et de bore devrait en plus être favorisée par la présence d'orbitales vacantes de basse énergie sur les fragments phosphorés (interaction à travers les liaisons), ainsi que par la répulsion des charges négatives des atomes de bore.

Stabilisation de l'état de transition

L'accès à de tels systèmes a été étudié expérimentalement. Le squelette désiré peut être obtenu en une étape, par addition de deux équivalents d'un phosphure de lithium sur un 1,2-dichlorodiborane (figure 9). L'étude par diffraction des rayons X réalisée sur le premier composé obtenu (substitué par des groupements phényle sur le phosphore et duryle sur le bore) a révélé une structure **3** intermédiaire entre celles d'un bicyclo[1.1.0]butane et d'un cyclobutane-1,3-diyle. En effet, la distance B-B (1,97 Å) est à la fois trop grande pour une

Figure 8 - Analogues des systèmes **III** et **IV** à base de phosphore et de bore.

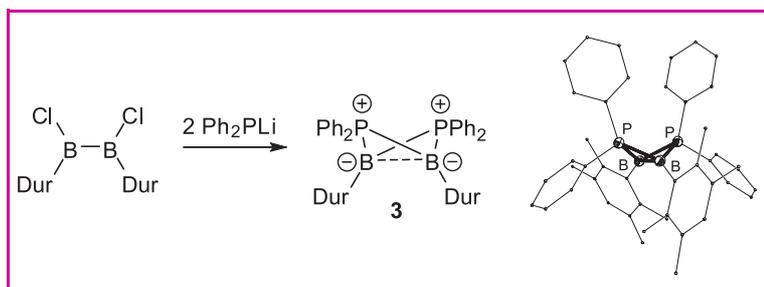


Figure 9 - Synthèse et structure du premier système mixte phosphore/bore **3**.

liaison simple « classique » (1,7-1,8 Å) et trop courte pour qu'il n'y ait pas d'interaction B-B.

Pour atteindre notre objectif, il nous fallait alors forcer la rupture de la liaison B-B. Pour cela, nous avons décidé de jouer sur les substituants du squelette central, l'augmentation des contraintes stériques devant, comme évoqué précédemment, plutôt favoriser la structure diradicalaire plane, moins compacte que la structure bicyclique. La même réaction a donc été répétée avec le diisopropylphosphure de lithium et le 1,2-dichloroborane substitué par des groupements tertbutyle. Une étude cristallographique nous a alors permis de montrer que le composé obtenu adoptait effectivement une structure plane, pratiquement carré (figure 10). Cette modification de géométrie par rapport au composé **3** se traduit par un allongement très important de la distance B-B qui atteint 2,57 Å dans le diradical **4**. L'obtention de **4** [17] illustre une fois encore l'apport des hétéroéléments, ici *via* la combinaison phosphore/bore, pour la stabilisation d'espèces hautement réactives. Le composé **4** présente en effet une stabilité thermique tout à fait remarquable ($T_f = 212\text{ }^\circ\text{C}$), et nous avons alors cherché à préciser la structure électronique de ce système afin d'identifier le rôle précis des hétéroéléments.

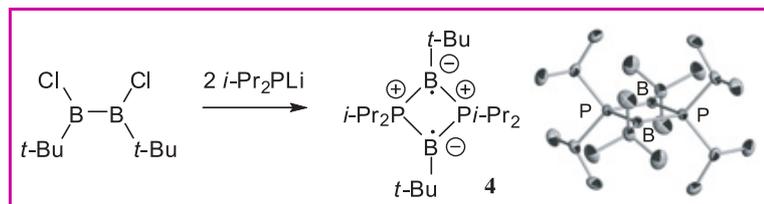


Figure 10 - Synthèse et structure du diradical **4**.

Un mode de liaison original : une interaction π sans contrepartie σ

Pour cela, les méthodes modernes de la chimie quantique constituent des outils particulièrement appropriés et une étude détaillée a été réalisée par Wolfgang Schoeller de l'Université de Bielefeld [17-18]. Comme pour le système carboné, l'état singulet du diradical parent n'est pas un minimum sur la surface de potentiel, mais seulement l'état de transition pour l'inversion des structures bicycliques correspondantes. La barrière d'inversion est cependant environ trois fois plus faible pour le système à base de phosphore et de bore que pour le système carboné. L'optimisation du système réel **4** conduit bien à une structure diradicalaire parfaitement plane. L'état de transition est maintenant un minimum qui peut être isolé ! Les substituants

des hétéroéléments ont donc une grande influence sur la structure de ces composés, et en particulier sur la distance B-B.

D'autre part, les diradicaux à base de phosphore et de bore sont singulets à l'état fondamental (l'état triplet est 17,2 kcal/mol moins stable que l'état singulet pour le système parent*). Par analogie avec les systèmes carbonés, ce résultat suggère l'existence d'une interaction entre les deux centres radicalaires dont nous avons cherché à préciser la nature. L'étude des orbitales frontières et plus particulièrement de la HO met clairement en évidence la participation d'orbitales de type σ^* sur les fragments phosphorés (figure 11).

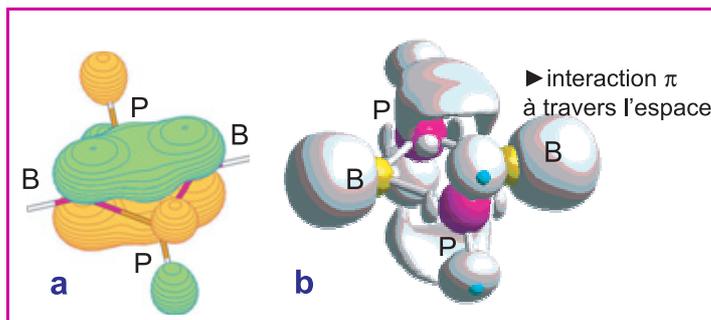


Figure 11 - Orbitale HO (la plus Haute Occupée) (a) et fonction ELF (« Electron Localization Function ») (b) du diradical parent.

Mais on observe également une interaction directe dans l'espace entre les deux orbitales atomiques 2p(B), et ce malgré la distance B-B. Le rayon de Van der Waals du bore (2,08 Å), très important pour un élément de cette période, explique probablement qu'une telle interaction puisse exister, même à si longue distance. La particularité de cette interaction dans l'espace réside dans sa symétrie. Formellement, on peut la considérer comme une liaison de type π entre les deux atomes de bore, mais on notera qu'elle n'est pas associée à une liaison de type σ puisqu'il n'y a pas de densité électronique selon l'axe des atomes ! On retrouve bien ici le fait que la stabilisation d'espèces transitoires et d'états de transition en particulier peut conduire à la mise en évidence de modes de liaisons originaux.

La surface de potentiel

Comme nous l'avons vu précédemment, l'étude théorique a souligné l'influence majeure des substituants du squelette central PBPB sur la structure du diradical **4**. Toute une série de composés comportant des substituants différents sur les atomes de phosphore et de bore a alors été préparée. Un véritable continuum a ainsi été mis en évidence entre le composé **5**, adoptant plutôt une structure bicyclique, et le composé **4** présentant une structure parfaitement plane (figure 12) [19]. D'un point de vue structural, on notera l'élongation correspondante de la distance B-B qui passe de 1,89 Å dans **5** à 2,57 Å dans **4** ! En modifiant simplement les substituants du squelette central, on peut donc isoler des composés de structure de plus en plus « ouverte » et mimer ainsi la surface de potentiel de l'inversion du bicyclic (figure 13). Cette approche est complémentaire des techniques ultra-rapides permettant l'observation des mouvements à l'échelle atomique et donc le suivi temporel d'une réaction donnée [20].

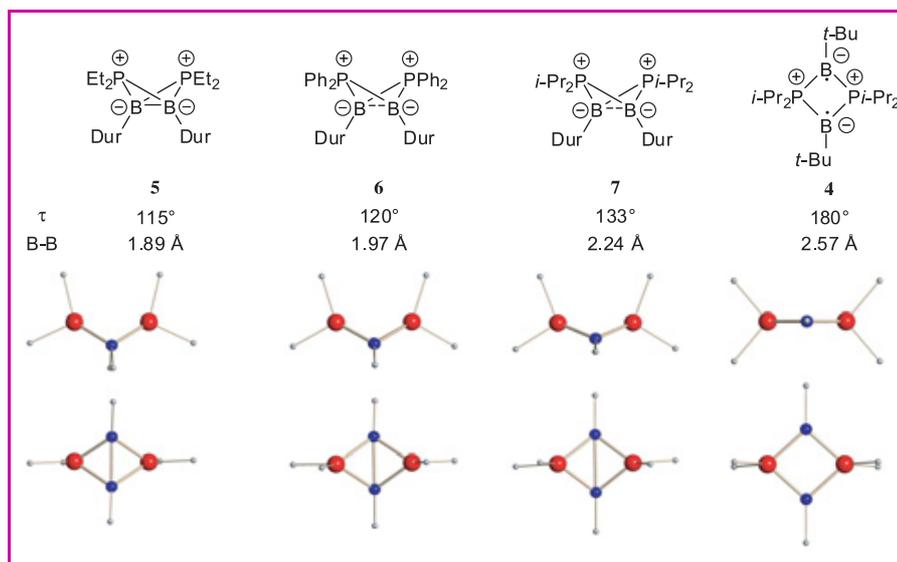


Figure 12 - Modulation de la structure des systèmes PBPB par les substituants du squelette central (τ : angle entre les deux plans PBB).

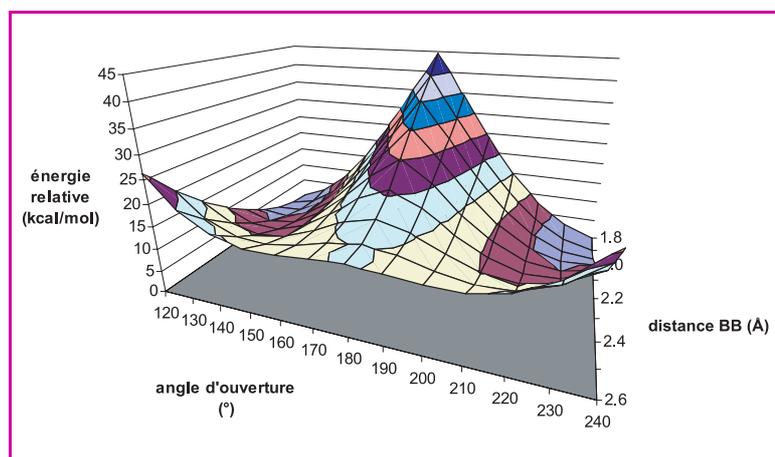


Figure 13 - Surface de potentiel schématisée de l'inversion du bicyclic.

La stabilisation ne se fait pas nécessairement au détriment de la réactivité

Si l'incorporation d'hétéroéléments peut stabiliser les diradicaux-1,3 au point de les rendre isolables, on peut légitimement se demander si les dérivés ainsi obtenus peuvent constituer des modèles représentatifs vis-à-vis des espèces transitoires correspondantes. En d'autres termes, dans quelle mesure la stabilisation de ces systèmes influence-t-elle leur réactivité ? Dans cette optique, nous nous sommes efforcés de démontrer que le composé **4** conserve effectivement un comportement de diradical (figure 14) [21]. Ainsi, il réagit spontanément avec le bromochloroforme pour conduire au bicyclic **8** après fixation d'un atome de brome et élimination d'une molécule de chloroforme. Des réactions « classiques » d'addition radicalaire ont également été observées. L'hydruide de

triméthylétain réagit par exemple sur **4** même en absence d'initiateur de radicaux pour donner l'adduit **9**.

Le fait de disposer de diradicaux-1,3 stables ouvre également des perspectives intéressantes dans le domaine des matériaux organiques, et notamment dans celui des polymères conducteurs. La communication entre unités diradicalaires est une question centrale pour de tels systèmes, et des premiers éléments de réponse ont pu être obtenus grâce à des tétraradicaux stables issus du couplage de deux diradicaux-1,3 [22].

Conclusion

L'exemple des diradicaux-1,3 montre comment les propriétés spécifiques des hétéroéléments peuvent être utilisées pour stabiliser des intermédiaires réactionnels et des états de transition. Cette approche permet en pratique d'obtenir des informations

détaillées sur la structure électronique et la réactivité de ces espèces transitoires, et éventuellement de mettre en évidence de nouveaux modes de liaisons. Outre cet aspect fondamental, les versions stables développées peuvent également conduire à des applications synthétiques importantes, et l'exemple des carbènes est tout à fait représentatif à cet égard. Ces espèces divalentes du carbone ont été postulées par Curtius et Staudinger il y a environ un siècle, et isolées pour la première fois par Guy Bertrand et coll. en 1988 [23]. Moins de vingt ans plus tard, les carbènes stables sont utilisés de façon très intensive, non seulement comme alternatives aux phosphines en tant que ligands des métaux de transition, mais également en tant que catalyseurs nucléophiles en synthèse organique et en polymérisation par ouverture de cycle.

Remerciements

L'ensemble de ce travail sur les diradicaux-1,3 a été réalisé en étroite collaboration avec Guy Bertrand. Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères. Je suis également très reconnaissant à Wolfgang Schöeller, Heinz Gornitzka, David Scheschkewitz, Hideki Amii, Lidija Vranicar et Gad Fuks pour leurs contributions à ce travail d'équipe.

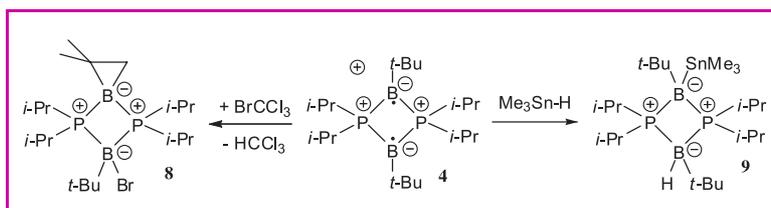


Figure 14 - Exemples de réactivité radicalaire de **4**.

Références

- [1] Olah G.A., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **1995**, *34*, p. 1393.
- [2] Speranza M., Sefcik M.D., Henis J.M.S., Gaspar P.P., *J. Am. Chem. Soc.*, **1977**, *99*, p. 5583.
- [3] Winkler M., Sander W., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2000**, *39*, p. 2014.
- [4] Cram D.J., Tanner M.E., Thomas R., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **1991**, *30*, p. 1024.
- [5] Warmuth R., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **1997**, *36*, p. 1347.
- [6] Olah G.A., Baker E.B., Evans J.C., Tolgyesi W.S., McIntyre J.S., Bastien I.V., *J. Am. Chem. Soc.*, **1964**, *86*, p. 1360.
- [7] Breslow R., *J. Am. Chem. Soc.*, **1957**, *79*, p. 5318.
- [8] Breslow R., Groves J.T., Ryan G., *J. Am. Chem. Soc.*, **1967**, *89*, p. 5048.
- [9] Yoshida Z., Tawara Y., *J. Am. Chem. Soc.*, **1971**, *93*, p. 2573.
- [10] Pour une discussion des propriétés spécifiques des hétéroéléments et des géométries inusuelles qu'ils peuvent induire, voir Bouhadir G., Bourissou D., *Chem. Soc. Rev.*, **2004**, *33*, p. 210.
- [11] Kolodiaznyy O.I., *Phosphorus Ylides: Chemistry and Application in Organic Synthesis*, Wiley-VCH, **1999**.
- [12] Bertrand G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1998**, *37*, p. 270.
- [13] Jain R., Sponsler M.B., Corns F.D., Dougherty D.A., *J. Am. Chem. Soc.*, **1988**, *110*, p. 1356.
- [14] Nguyen K.A., Gordon M.S., Boatz J.A., *J. Am. Chem. Soc.*, **1994**, *116*, p. 9241.
- [15] Abe M., Adam W., Heidenfelder T., Nau W.M., Zhang X., *J. Am. Chem. Soc.*, **2000**, *122*, p. 2019.
- [16] Niecke E., Fuchs A., Baumeister F., Nieger M., Schoeller W.W., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1995**, *34*, p. 555.
- [17] Scheschkewitz D., Amii H., Gornitzka H., Schoeller W.W., Bourissou D., Bertrand G., *Science*, **2002**, *295*, p. 1880.
- [18] Schoeller W.W., Rozhenko A., Bourissou D., Bertrand G., *Chem. Eur. J.*, **2003**, *9*, p. 3611.
- [19] Scheschkewitz D., Amii H., Gornitzka H., Schoeller W.W., Bourissou D., Bertrand G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2004**, *43*, p. 585.
- [20] Zewail A.H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2000**, *39*, p. 2587.
- [21] Amii H., Vranicar L., Gornitzka H., Bourissou D., Bertrand G., *J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, p. 1344.
- [22] Rodriguez A., Tham F.S., Schoeller W.W., Bertrand G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2004**, *43*, p. 4876.
- [23] Bourissou D., Guerret O., Gabbai F.P., Bertrand G., *Chem. Rev.*, **2000**, *100*, p. 39.



Didier Bourissou

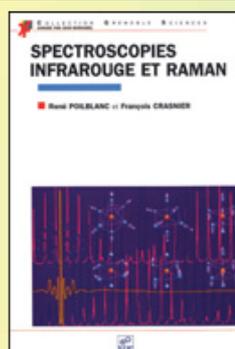
est directeur de recherche CNRS dans l'équipe « Ligands bifonctionnels et polymères biodégradables », Laboratoire Hétérochimie fondamentale et appliquée, à l'Université Paul Sabatier*. Il a reçu la **Médaille de bronze du CNRS en 2005**.

* Université Paul Sabatier, Laboratoire Hétérochimie fondamentale et appliquée (UMR 5069), Équipe « Ligands bifonctionnels et polymères biodégradables », 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9.
Tél. : 05 61 55 77 37. Fax : 05 61 55 82 04.
Courriel : dbouriss@chimie.ups-tlse.fr



Collection Grenoble Sciences

Cette collection, destinée aux étudiants, chercheurs et scientifiques des premier et deuxième cycles universitaires, regroupe des ouvrages originaux, parmi les meilleures réalisations de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les ouvrages sont sélectionnés pour leurs qualités pédagogiques et scientifiques et couvrent de nombreuses disciplines notamment la chimie...



Spectroscopies infrarouge et Raman

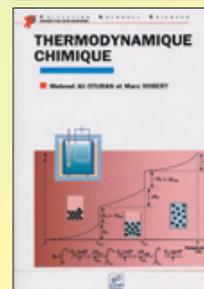
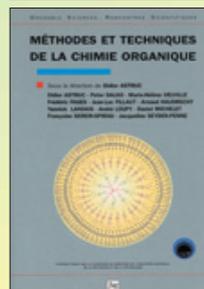
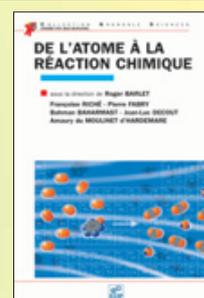
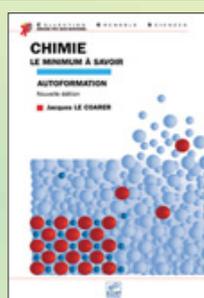
René Poilblanc et François Crasnier

Les avancées des vingt dernières années ont permis le développement de nouveaux "objets" chimiques (structures organiques et inorganiques, complexes de coordination, structures cristallines, magnétiques, amorphes, nanométriques...) et de leurs méthodes de caractérisation. Ainsi, les spectroscopies mettant en jeu les vibrations des molécules sont devenues indispensables dans l'étude fine des objets aux frontières de la chimie, la physique et la biologie. Les études vibrationnelles, avec utilisation constante de la théorie des groupes de symétrie, sont le fil conducteur de l'ouvrage.

L'exposé part des ions et molécules de haute symétrie pour aboutir aux solides cristallins. Les questions fondamentales sont développées en général à partir d'exemples, et des exercices avec leurs corrigés sont aussi proposés. Des compléments et des annexes permettent au lecteur d'élargir son information. Ces annexes et de nombreuses tables de données permettent un travail autonome. Enfin, des guides de lecture, en introduction à chaque chapitre ou groupe de chapitres, mettent en évidence les articulations de l'ouvrage.

Ce livre de référence en langue française intéressera les étudiants des masters de chimie, physique-chimie ou biochimie, ainsi que les universitaires, chercheurs et professionnels concernés par "l'infrarouge et le Raman".

• 2006 • ISBN 2-86883-744-1 • 688 pages • 59 €



www.edpsciences.org