

les bosons composés subissent un faible champ magnétique résultant. Cependant, comme les supraconducteurs réels, les supraconducteurs de bosons composés supportent un faible champ magnétique, et la conductance de Hall est inchangée quand le facteur de remplissage n'est que voisin de $1/3$.

L'analogie entre la supraconduction et l'effet Hall quantique va encore plus loin. Par exemple, de même que les supraconducteurs repoussent un champ magnétique, les électrons présentant l'effet Hall quantique s'opposent à tout changement survenant dans le domaine qu'ils occupent (les électrons de l'effet Hall sont dits «incompressibles»).

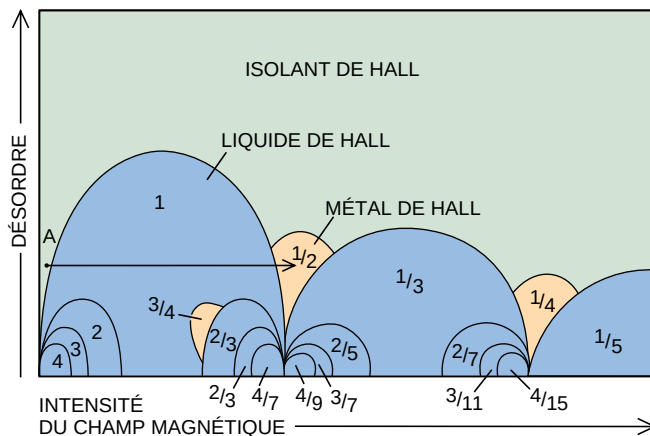
D'autres aspects de la supraconduction, plus obscurs, ont aussi leur analogue dans l'effet Hall quantique.

Une carte du confinement

À l'aide de la théorie des bosons composés, nous avons étudié l'effet Hall quantique dans de nombreuses conditions physiques et nous avons établi un diagramme de phase qui représente les divers comportements. Quand les physiciens étudient le comportement d'un composé comme l'eau, ils indiquent ses diverses formes – glace, liquide ou vapeur – en fonction, par exemple, de la pression et de la température.

Dans le cas des électrons en deux dimensions, les paramètres du diagramme de phase sont l'intensité du champ magnétique et le désordre des cristaux semi-conducteurs qui piègent les électrons. Nous avons obtenu ce diagramme théorique par analogie avec celui des supraconducteurs désordonnés. La reproduction des informations contenues dans le diagramme de phase pour les supraconducteurs fait apparaître une belle structure emboîtée (voir la figure 5).

La théorie des bosons composés a également conduit à la prédiction d'un état inattendu, où les électrons présentent simultanément les propriétés d'un isolant et d'un métal. Cette prédiction d'un «isolant de Hall» a été récemment confirmée par les expériences de Hong-Wen Jiang et



5. LES NOUVEAUX ÉTATS de la matière engendrés par le confinement d'électrons dans un plan (deux dimensions) sont représentés sur un diagramme de phase. Dans un champ magnétique faible et dans un matériau peu désordonné (point A, à gauche), les électrons se comportent comme un «isolant de Hall» (en vert), qui est à la fois isolant et métallique. Dans des champs magnétiques plus intenses, les électrons forment un «liquide de Hall» (en bleu) : ils manifestent l'effet Hall quantique. Dans certaines circonstances, ils provoquent l'apparition d'un «métal de Hall» (en beige). Les nombres indiquent les valeurs entières et fractionnaires de la conductance de Hall quantifiée.

de ses collègues de l'Université de Los Angeles : en augmentant le désordre dans les semi-conducteurs, ils ont atteint un point au-delà duquel il fallait appliquer une tension très importante pour entretenir le courant. Cette tension appliquée augmentait régulièrement, à mesure que l'on réduisait la température, jusqu'à atteindre presque le zéro absolu – ce qui est caractéristique d'un isolant. Toutefois, simultanément, la tension de Hall était constante, et elle augmentait avec l'intensité du champ magnétique – ce qui est caractéristique d'un métal.

D'autres expériences ont révélé une propriété étonnante des électrons au voisinage du facteur de remplissage $1/2$: les électrons se comportaient comme s'ils étaient dans un métal ordinaire, sans champ magnétique ; la conductance de Hall n'était pas quantifiée, mais proportionnelle au champ magnétique.

On peut expliquer la formation de ce «métal de Hall» en considérant les électrons comme des fermions composés. Un fermion composé ressemble à un boson composé, sauf qu'il est porteur d'un nombre pair de quanta de flux magnétique fictif et qu'il obéit donc à la statistique de Fermi.

Ces notions de bosons ou de fermions composés permettent de relier le comportement apparemment étrange des électrons en deux dimensions au comportement normal des particules composées. Ces particules

composées sont-elles réelles ou bien, comme les quarks en physique des particules, ne sont-elles que des abstractions utiles qui ne peuvent être étudiées individuellement ? La question reste posée.

Plus de 15 ans après sa découverte, l'effet Hall quantique reste l'un des domaines les plus passionnants de la physique de la matière condensée. La multiplicité des phénomènes en jeu a fourni un banc d'essai à de nombreuses idées théoriques. Il en ressort une vision qui unifie la compréhension de ces phénomènes avec celle d'autres phénomènes dans la matière condensée. Toutefois des questions importantes sub-

sistent. Par exemple, on est encore loin d'une compréhension satisfaisante de l'isolant de Hall ou du métal de Hall. On ne sait pas non plus comment intégrer dans cette vision d'autres propriétés des électrons, comme leur spin.

La véritable importance de l'effet Hall quantique ne réside pas dans ses applications éventuelles, mais dans la compréhension nouvelle que les physiciens ont acquise des propriétés particulières des systèmes d'électrons dans les champs magnétiques intenses. La nature peut très bien garder en réserve d'autres états surprenants de la matière auxquels personne ne pense aujourd'hui et qu'il nous reste à découvrir.

Steven KIVELSON et Dung-Hai LEE sont professeurs de physique à l'Université de Los Angeles. Shou-Cheng ZHANG est professeur à l'Université de Stanford.

Bertrand I. HALPERIN, *Quantized Hall Effect*, in *Scientific American*, vol. 254, n° 4, avril 1986.

Frank WILCZEK, *Les anyons*, *Pour la Science*, juillet 1991.

Shou-Cheng ZHANG, *The Chern-Simons-Landau-Ginzburg Theory of the Fractional Quantum Hall Effect*, in *International Journal of Modern Physics B*, vol. 6, n° 1, pp. 25-58, janvier 1992.

S. KIVELSON, D.-H. LEE et S.-C. ZHANG, *Global Phase Diagram in the Quantum Hall Effects*, in *Physical Review B*, vol. 46, n° 4, pp. 2223-2238, 15 juillet 1992.

Les mangroves des Caraïbes

KLAUS RÜTZLER • ILKA FELLER

Des plantes et des animaux se sont adaptés pour vivre à la limite entre la terre et la mer. Ils forment un écosystème diversifié, fragile et surprenant.

Une forêt de palétuviers déchiquetés et noueux qui émergent de la surface de l'eau, des racines qui plongent dans une vase noire et fétide, des frondaisons verdoyantes sous le soleil ardent, un bourdonnement incessant d'insectes : voilà les mangroves des côtes tropicales. Ici, la terre et la mer se mélangent.

Qu'est-ce qu'une mangrove ? S'agit-il d'un type particulier de récif corallien ou d'une forêt amphibie ? Par rapport aux forêts tropicales continentales, qui contiennent jusqu'à 100 espèces différentes d'arbres par hectare, la mangrove est monotone et pauvre : les forêts de mangroves les plus diversifiées, sur les côtes indo-pacifiques, ne contiennent qu'une quarantaine d'espèces de palétuviers au total. Ailleurs elles ne sont constituées que de huit espèces de palétuviers, dont seulement trois sont vraiment courantes.

«Palétuvier» n'est pas un nom phylogénétique ; il désigne tous les arbres capables de vivre dans l'eau de mer peu profonde. Leurs tissus repoussent

le sel ou l'excrètent. Leurs racines aériennes, qui assurent les échanges gazeux nécessaires à la respiration aérobie, leur permettent de survivre dans la zone intertidale, c'est-à-dire où le sol est régulièrement couvert et découvert par la marée. Un milieu salé n'est pas indispensable à la croissance des palétuviers, mais ils ne poussent qu'en bord de mer, car ils sont incapables d'entrer en compétition avec la flore d'eau douce.

L'extension géographique des zones de mangroves est aussi limitée par les contraintes climatiques. Comme les coraux, elles ont besoin d'une température douce : les palétuviers ne vivent que là où la température moyenne de l'eau est supérieure à 23°C. Ainsi trouve-t-on des mangroves là où sont aussi présents des récifs coralliens : le long des côtes tropicales. Cette association connaît des exceptions : les côtes continuellement soumises à d'importants apports de sédiments, tels les rivages d'Afrique occidentale, et les zones où des eaux froides remontent vers la surface,

comme au large de l'Est du Venezuela, sont dépourvues de récifs coralliens, alors qu'elles abritent des mangroves importantes. À l'inverse, des îles coralliennes du Pacifique central ne sont pas bordées de forêts de mangroves, apparemment parce que les propagules flottantes, semences des palétuviers, ne les atteignent pas.

On distingue deux types d'écosystèmes de mangroves, selon qu'ils occupent la côte d'un continent ou d'une île. Les littoraux à mangroves des côtes continentales sont inondés à la fois par l'eau salée de l'océan et par l'eau douce des fleuves : elles s'adaptent au fort gradient de salinité qui s'étend de l'intérieur vers la mer. Les mangroves des îles, qui se forment sur des hauts-fonds ou sur des zones lagunaires éloignées du continent, subissent plutôt des variations de la salinité au cours du temps, en raison de l'évaporation intense et des pluies tropicales.

Les écosystèmes de mangroves sont-ils aussi variés et productifs que d'autres écosystèmes tropicaux ?



1. LES VASIÈRES MARITIMES des pays tropicaux (ci-dessus) sont souvent colonisées par une association végétale nommée mangrove, constituée principalement de palétuviers. Ces arbres (à droite), adaptés à de fortes concentrations en sel dans le sol, se développent dans les eaux aux températures moyennes supérieures à 23 °C. Les auteurs ont étu-

dié les écosystèmes à mangroves de la barrière de corail qui longe la côte du Belize (cartouche). Ces marais abritent une faune et une flore variées dans la voûte sombre des arbres et au pied des racines des palétuviers immergées en permanence. Des espèces se sont adaptées pour vivre dans la zone soumise au balancement des marées.



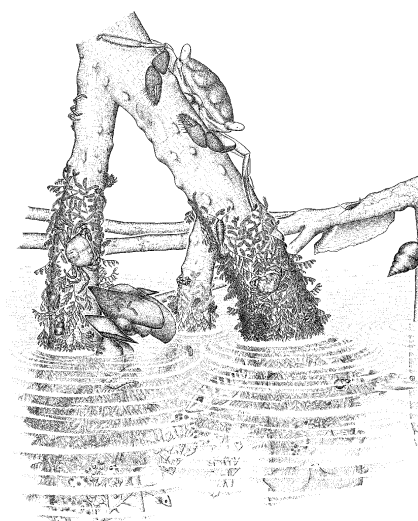
Protègent-ils les jeunes poissons d'espèces d'intérêt commercial autant que certains le prétendent? Protègent-elles le littoral de l'érosion? Pour répondre à ces questions, nous avons entrepris une campagne de recherche interdisciplinaire de longue durée sur une zone de mangrove océanique : nous avons analysé en détail la biodiversité et l'écologie de la barrière corallienne qui s'étend au large des côtes du Belize, en Amérique centrale. Nous avons conduit cette campagne à partir d'une base permanente située sur la petite île corallienne de Carrie Bow, à une quinzaine de kilomètres du continent.

Un long passé

Les études ont commencé en 1972, lorsque nous avons découvert cette île, par hasard. Y vivaient un planteur de citronniers, Henry Bowman, et sa femme Carrie qui, passionnés de sciences naturelles, ont accueilli en un quart de siècle plus de 70 naturalistes de 40 organismes de diverses nationalités. Nous avons centré nos recherches sur Twin Cays, deux îlots jumeaux, proches de Carrie Bow, dont le lagon peu profond est bordé, sur plus d'un kilomètre carré, par des formations à mangrove quasi vierges.



2. LES ÎLES DE CARRIE BOW (à l'arrière-plan) et de Twin Cays (au centre) ont servi aux auteurs de base et de laboratoire naturel. Les pointillés en croix, au fond du lagon, marquent les cicatrices laissées dans le couvert de plantes aquatiques aux endroits où des équipes de recherche pétrolière ont utilisé des explosifs pour effectuer des prospections sismiques dans les années 1960.



3. LES RACINES-ÉCHASSES DES PALÉTUVIERS découvertes à marée basse sont gainées d'algues de l'espèce *Bostrychietum*. De telles surfaces abritent aussi de nombreux invertébrés, tels l'huître de mangrove (*Isognomon*) et le crabe des palétuviers (*Aratus*).

Ces formations sont dispersées par plaques sur le récif corallien. Les bouquets de palétuviers couvrent tout le récif corallien : les premiers arbres avaient-ils poussé sur des blocs de corail isolés? L'examen de carottes du sédiment déposé sur le fond a révélé que la mangrove n'avait pas commencé à pousser sur le corail, mais, il y a 7 000 ans, sur ce qui était à l'époque un sol émergé. Depuis cette époque, sept mètres de sol tourbeux se sont accumulés, à mesure que le niveau des eaux montait.

Élaborée en plusieurs milliers d'années, la topographie de Twin Cays porte les traces des innombrables tempêtes et ouragans tropicaux qui sont venus frapper cette île bordée de mangroves. Le bras de mer peu profond qui coupe l'île et se divise en deux chenaux, dont l'un est sans issue, est la trace d'un événement violent. Dans les méandres du chenal en cul-de-sac, des entailles profondes, pas encore comblées par de la tourbe ou par des sédiments, indiquent que de violents courants traversaient ce passage avant qu'une tempête exceptionnelle ne dépose assez de sédiments et n'en obstrue une issue.

Les rives de Twin Cays et de ses chenaux sont bordées de grands palétuviers rouges (*Rhizophora mangle*) qui enfoncent leurs racines-échasses dans l'eau plus profonde, au-delà de la vasière qui porte les arbres. Plus à l'intérieur, des palétuviers noirs (*Avicennia germinans*), puis des palétuviers blancs (*Laguncularia racemosa*) délimitent les zones inondables peu profondes et les bancs de boue qui résultent des mouvements de la marée. Comme l'évaporation, sous le soleil intense des tropiques, fait disparaître rapidement l'eau stagnante, la saumure qui reste dans les bas-fonds est souvent concentrée en sel. La limite supérieure atteinte par les marées, là où la salinité est maximale, est colonisée par des palétuviers noirs, l'espèce qui supporte le mieux le sel. Les jeunes palétuviers blancs ne survivent pas à la salinité élevée ni à la submersion périodique de cette zone par l'eau de mer : ces arbres sont cantonnés à des zones plus hautes. Enfin, les palétuviers rouges dominent dans les parties basses de la zone intertidale : perchés sur leurs racines-échasses, ils survivent notamment à la pauvreté en nutriments et aux nombreux prédateurs.

L'intérieur de Twin Cays est parsemé de nombreuses dépressions et étendues vaseuses. Sur certaines, aucun arbre ne pousse ; sur d'autres ne subsistent que les souches érodées de grands arbres. D'autres étendues encore sont couvertes d'une forme naine de palétuvier rouge, des arbres qui ne dépassent guère un mètre de haut, quoiqu'ils soient parfois âgés de plusieurs dizaines d'années. La croissance de ces palétuviers à l'allure de bonsaïs n'est pas ralentie par le stress physiologique associé à la forte salinité et aux températures élevées, mais par l'absence d'un nutriment, le phosphore.

Trois milieux dans la mangrove

La végétation de Twin Cays est stratifiée verticalement, en trois zones : la voûte des arbres, la zone intertidale et une zone de type récif qui s'étend même sous les eaux les plus calmes.

Nous avons étudié la flore et la faune de ces trois environnements.

La canopée des formations arborescentes grouille d'insectes, de lézards, de serpents et d'oiseaux. Bien que les insectes soient le groupe le plus nombreux, l'ardeur du soleil et l'absence d'eau douce créent un environnement qui leur est peu favorable. Seules quelques espèces sont actives le jour ; la plupart sortent la nuit pour se nourrir ou bien vivent complètement à l'intérieur des plantes. La dissection de plantes nous a permis de récolter de nombreuses larves que nous avons élevées : nous avons ainsi montré que la faune entomologique de la mangrove est beaucoup plus diversifiée et abondante qu'on ne le pensait.

Ainsi les branches vivantes des palétuviers rouges abritent plusieurs espèces de lépidoptères et de coléoptères dont les larves se nourrissent de l'intérieur des rameaux, forant des trous cylindriques dans le bois.

Lorsque ces foreurs primaires émergent, 70 autres espèces de fourmis, d'araignées, de scorpions, d'acariens, de papillons, de cafards, de termites et de scorpions colonisent ces rameaux creux où ils se nourrissent, chassent et font leur nid, à l'abri du soleil.

Si la faune qui vit au-dessus du niveau des eaux les plus hautes ressemble beaucoup à celle des autres formations arborescentes des tropiques, l'enchevêtrement inextricable des racines-échasses des palétuviers rouges, des pneumatophores des palétuviers noirs (les racines aériennes qui leur permettent de respirer) et des bancs de tourbe et de vase abrite des habitants spécifiques des mangroves. Les racines-échasses sont fréquemment recouvertes d'une association d'algues rouges spécialement adaptée pour retenir l'eau lorsque la mer se retire. Les racines servent de support aux huîtres et de niche écolo-



4. LA BARRIÈRE CORALLIENNE DU BELIZE est séparée de la côte par un lagon large et peu profond. Les littoraux à mangroves du continent (à gauche) vivent dans un fort gradient horizontal de salinité, entre

l'eau douce (en bleu) qui irrigue le continent et l'eau de mer salée (en rouge). Les mangroves insulaires, situées au large (à droite), doivent plutôt s'adapter à des fluctuations temporelles de la salinité.



5. DE NOMBREUSES ESPÈCES de plantes, d'arthropodes, d'insectes et d'escargots peuplent la partie émergée de la man-



grove. La bécassine marbrée (l'oiseau dessiné à gauche) y trouve une nourriture abondante.

gique aux crabes et aux oies sauvages. L'un des hôtes les plus étonnants de la zone intertidale est un petit poisson nommé rivulus des mangroves (*Rivulus marmoratus*) : cette espèce hermaphrodite est l'un des rares exemples de vertébré capable de s'autoféconder.

Le milieu le plus riche et le plus densément peuplé de la mangrove est la partie immergée des racines-échasses des palétuviers rouges. Plusieurs espèces d'algues, d'éponges et d'anémones de mer y prospèrent : elles

recouvrent les racines d'une gaine biologique qui fournit nourriture et abri pour divers animaux, tels les huîtres de palétuvier et des crabes. La constitution particulière des racines n'est pas la cause de leur colonisation : après une semaine d'immersion dans ce milieu, tout matériau non toxique (bois, plastique ou verre) est d'abord recouvert par une couche de mucus microbien, puis par des algues et par divers invertébrés. Ce revêtement protège en partie les racines des palétuviers contre les animaux foreurs.

Le brassage des sédiments

La vasière maritime immergée en permanence est occupée par des prairies aquatiques denses, particulièrement fournies dans les chenaux bien ensoleillés. Les algues et les méduses prolifèrent sur certains fonds sableux et vaseux. Les sédiments, un mélange de sable, de boue et de détritus, sont constamment remis en suspension par les courants et par divers organismes. Les grands animaux qui broutent les prairies aquatiques, tels les lamantins,

Les mangroves des Rivières du Sud

Les mangroves, encore mal connues, sont perçues diversement : sont-elles des marais à la boue fétide, à la végétation impénétrable, infestés de moustiques et de bêtes sauvages, ou des bouquets de palétuviers roses sous lesquels il fait bon batifoler ? Des discours contradictoires sont tenus à leur propos : milieu sain ou malsain, riche ou pauvre, fragile ou robuste, vierge ou densément peuplé. Les politiques de gestion sont incohérentes, de la transformation radicale à la conservation totale.

À l'échelle mondiale, les zones de mangroves ne cessent de se réduire en raison des aménagements portuaires, industriels et urbains et du développement des activités agricoles, aquacoles et récréatives. Des scientifiques dénoncent plus particulièrement les vastes aménagements visant à une utilisation unique et intensive des mangroves, dont les impacts sur le milieu sont difficilement réversibles, tel le défrichement des forêts de palétuviers dans les Caraïbes, cité dans l'article de Klaus Rützler et Ilka Feller, ou encore la crevette-culture, qui constitue sans nul doute un des principaux impacts « anthropiques ». Hormis ces pressions, les mangroves sont le plus souvent des espaces inhabités, sauf par de petits campements saisonniers de pêcheurs.

La gestion des littoraux à mangrove de la région nommée Rivières du Sud, qui s'étend du Sénégal à la Sierra Leone, en Afrique de l'Ouest, est originale : les communautés littorales ont élaboré des systèmes d'usages multiples des ressources de la mangrove et ont maintenu leur maîtrise technique, économique et sociale de cet écosystème amphibie. Cette zone littorale, densément peuplée, est l'un des deux plus anciens foyers de riziculture d'Afrique, avec le Delta central du Niger. Les sociétés égalitaires de riziculteurs ont mis en œuvre des techniques ingénieuses et intensives d'exploitation de la mangrove et ont élaboré une véritable civilisation du riz. La pêche, le sel et le bois, la récolte du vin de palme et autres fruits de la « brousse », le commerce et le transport constituent autant d'activités complémentaires à la riziculture. La mangrove des Rivières du Sud est ainsi un espace de production et de vie, dont des communautés entières dépendent pour leur existence. Les acteurs locaux sont de remarquables aménageurs ou constructeurs de pay-

sages rizicoles, qui n'ont rien à envier à ceux façonnés dans les deltas du Sud-Est asiatique.

L'exemple des Rivières du Sud conduit à repenser la question de la fragilité des mangroves et des relations réciproques hommes-milieu. Selon des paléoclimatologues, ces écosystèmes sont robustes et stables, à l'échelle de millénaires. Depuis 25 ans, les forêts de palétuviers ont reculé, et les étendues sursalées se sont considérablement étendues. Cette dégradation n'est pas due à la pression anthropique, mais, au contraire, à l'exode rural et au non-entretien des aménagements hydro-agricoles traditionnels, exigeants en travail manuel. L'assèchement du climat, à partir de la fin des années 1960, a accéléré et rendu à bien des égards irréversibles les processus de salinisation des sols et des eaux.

La définition des mangroves, ainsi que les rôles et les valeurs de ces milieux ont été abordés dans le programme de recherches pluridisciplinaires sur les littoraux à mangroves des Rivières du Sud. La définition des mangroves comme « une association végétale caractéristique des milieux intertidaux tropicaux » est trop restrictive. Pour appréhender le fonctionnement, la dynamique et les usages de la mangrove, différentes échelles spatiales (de la racine du palétuvier jusqu'aux écosystèmes adjacents, océaniques et continentaux) et différentes échelles de temps (du cycle de marée aux grandes périodes hydroclimatiques) doivent être pris en compte, selon les questions posées.

La définition des mangroves est un enjeu scientifique, mais aussi politique, économique et social. De cette définition dépend en effet le statut légal de ces espaces de transition : sont-ils des réserves naturelles de biosphère à protéger, des front pionniers à exploiter à des fins alimentaires et commerciales, ou des composantes des terroirs villageois ? Une démarche pluridisciplinaire et comparative entre les divers littoraux à mangroves permettra de mieux saisir les mangroves dans toute leur complexité et conduira à la mise en œuvre de politiques de gestion respectueuses de l'environnement et du bien-être des communautés locales.

Marie-Christine CORMIER-SALEM
ORSTOM, Montpellier