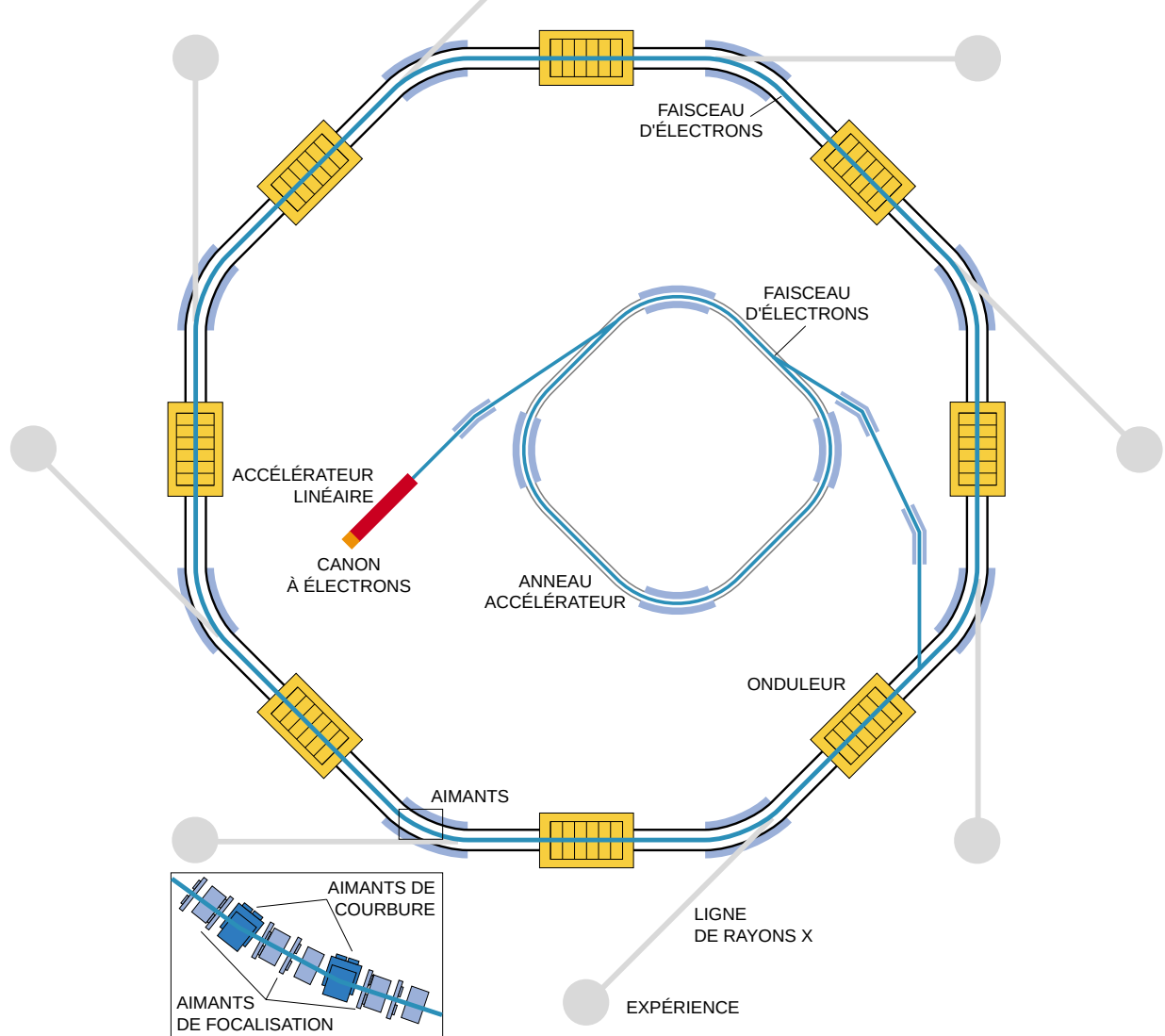
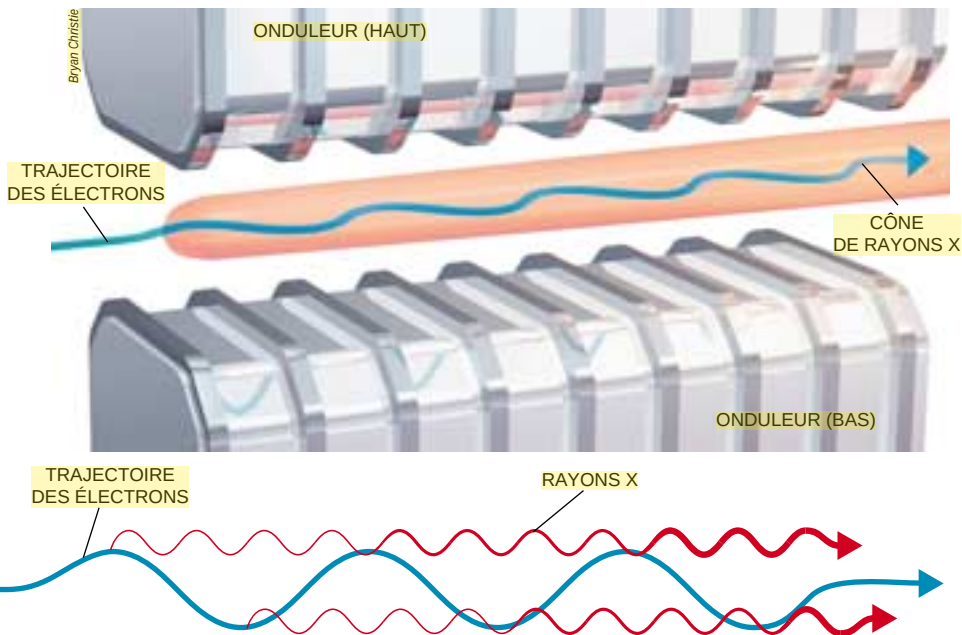




Bryan Christie et Dmitry Kasoy

2. DANS LES NOUVELLES SOURCES DE RAYONS X, un courant d'électrons circule à une vitesse voisine de celle de la lumière pendant plusieurs heures de suite. Les électrons créés par un canon à électrons sont accélérés par un accélérateur linéaire, puis ils pénètrent dans un petit anneau accélérateur, qui augmente encore leur énergie. Finalement, les particules sont injectées dans l'anneau de stockage, où elles tournent en petits paquets de l'épaisseur d'un cheveu, chacun émettant une impulsion électromagnétique très brillante pendant qu'il parcourt l'une des sections courbes. La trajectoire des

électrons est guidée par des aimants (en bleu) disposés en réseaux (détail en bas à gauche) : des aimants de focalisation maintiennent les électrons en minces paquets concentrés ; les autres aimants incurvent la trajectoire. Le rayonnement est aussi produit dans des onduleurs (en jaune), disposés sur les sections droites de l'anneau. Une partie du rayonnement émis dans les sections courbes et la plupart du rayonnement émis dans les onduleurs quitte l'anneau tangentiellement à celui-ci : on le récupère dans des «lignes de lumière» sur lesquelles on installe des expériences (cercles gris).



Lawrence Berkeley National Laboratory

3. UN ONDULEUR crée un champ magnétique alterné le long de la trajectoire des électrons. En sinuant autour de la direction moyenne de propagation, les électrons émettent des rayons X très brillants. Les ondes émises des différents points de la trajectoire (ligne bleue) restent dans un cône étroit (en rose) et interfèrent. Seules les ondes de certaines fréquences interfèrent constructivement : elles se superposent, de sorte que tous leurs maxima et leurs minima se trouvent aux mêmes endroits (en bas à gauche). Ces fréquences dépendent de la distance (variable) entre les deux rangées d'aimants de l'onduleur (ci-dessus).

sections légèrement courbes. Deux types d'électro-aimants focalisent le faisceau et un troisième l'incurve. À chaque changement de direction d'un paquet d'électrons, ceux-ci émettent une brève bouffée de rayons X, tangentielllement à leur trajectoire : on récupère ce rayonnement dans une «ligne de rayons X», à l'extrémité de laquelle on installe des expériences.

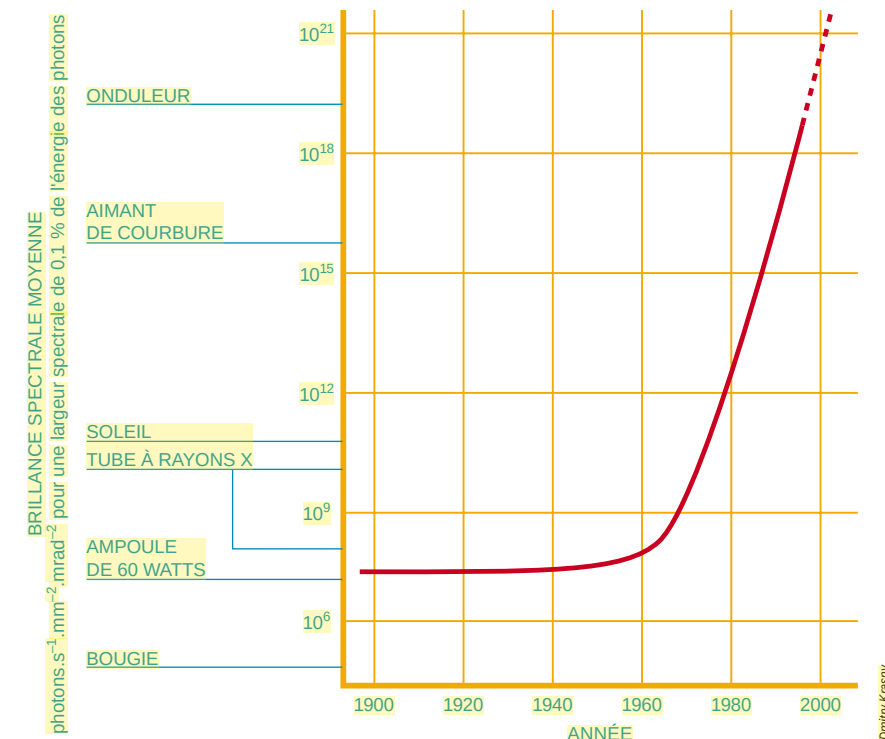
Pourquoi la brillance des rayons X a-t-elle tant augmenté ? D'une part, on dispose aujourd'hui de microprocesseurs puissants et peu coûteux qui permettent la conception, la modélisation, la construction et la commande de composants plus performants pour les anneaux de stockage : on ajuste ainsi beaucoup mieux le faisceau d'électrons, que l'on positionne avec une précision de l'ordre de quelques centièmes de sa largeur. Le faisceau, très stable, émet des rayons X nets et brillants.

D'autre part, les nouveaux anneaux de stockage sont équipés d'onduleurs, qui transforment certaines parties droites de la trajectoire du faisceau en sinusoïdes de faible amplitude, mais de grande fréquence. Le cœur d'un onduleur est une double rangée d'aimants permanents qui créent une alternance de champs magnétiques très intenses dirigés vers le haut et vers le bas, perpendiculairement au faisceau d'électrons. Comme les électrons émettent des rayons X à chaque changement de direction, leur passage dans un onduleur provoque l'émission d'un rayonnement intense (voir la figure 3).

À chaque changement de direction, le rayonnement est émis dans un cône étroit. Les ondes s'ajoutent, se renforçant ou s'annulant selon leur longueur d'onde, de sorte que l'intensité est augmentée à certaines longueurs d'onde. En outre, le rayonnement est généralement partiellement cohérent : les maxima et les minima des ondes X tendent à coïncider. En ajustant la distance entre les deux rangées d'aimants, on ajuste les fréquences renforcées par l'onduleur, une fréquence fondamentale et ses multiples.

L'observation des parasites

Avec leurs courtes longueurs d'onde, leur brillance et leur cohérence partielle, les rayons X émis par les anneaux de stockage les plus récents permettent aujourd'hui d'étudier des objets et des phénomènes qui, en raison de leur taille



4. LA BRILLANCE DES RAYONS X a considérablement augmenté depuis la première utilisation du rayonnement émis par un accélérateur de particules, dans les années 1960. L'utilisation de dispositifs magnétiques nommés onduleurs a multiplié cette brillance par 100 environ.

ou de leur opacité, n'étaient pas analysables il y a seulement cinq ou six ans. Nous examinerons quelques applications, qui montrent à la fois la diversité des sujets abordés et celle des utilisations du rayonnement synchrotron.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, le paludisme tue 2,7 millions de personnes par an, surtout des enfants. Cette maladie est causée par des parasites des globules rouges, le plus meurtrier étant *Plasmodium falciparum* qui est transmis par la femelle du moustique anophèle. Il envahit les globules rouges de l'hôte infecté, où il se divise et où il digère l'hémoglobine, dans une vacuole nutritive, pour produire la plupart des acides aminés nécessaires à son métabolisme. On ne connaît pas de vaccin efficace, et la résistance de *Plasmodium falciparum* aux médicaments disponibles s'accroît.

Cathleen Magowan, Werner Meyer-Ilse et John Brown, du Laboratoire Lawrence Berkeley, ont utilisé les rayons X de l'ALS, l'anneau de stockage installé à Berkeley, en Californie, pour étudier les étapes du cycle de reproduction du parasite et l'action de divers médicaments. À l'aide de rayons X d'une longueur d'onde de 2,4 nanomètres, ils ont obtenu des images de globules rouges infectés avec une résolution cinq à dix fois supérieure à celle

d'un microscope en lumière visible (voir la figure 5). De très petites structures apparaissent dans les cellules infectées et, même, à l'intérieur du parasite. Le bon contraste des images permettait aussi des mesures précises et directes de la répartition des masses à l'intérieur du parasite. Ainsi, C. Magowan a suivi la redistribution de l'hémoglobine, du cytoplasme du globule rouge vers la vacuole nutritive du parasite, dans les conditions normales et au cours de traitements médicamenteux qui, inhibant les enzymes de digestion du parasite, provoquent un gonflement de la vacuole nutritive par accumulation d'hémoglobine non digérée et peuvent ainsi tuer le parasite.

Plus de transistors

Des faisceaux de rayons X brillants et partiellement cohérents sont aussi utiles, indirectement, pour l'amélioration des performances des microprocesseurs. Les microprocesseurs sont des assemblages de transistors gravés à la surface de pastilles de silicium. Cette gravure est faite en plusieurs étapes : le silicium est recouvert de résine photosensible, sur laquelle on projette, généralement avec de la lumière ultraviolette, l'image d'un masque qui reprend une

partie du dessin du microprocesseur ; la résine qui a été irradiée est dissoute par un réactif chimique ; le silicium ainsi découvert subit divers traitements, puis on enlève toute la résine et on recommence la suite d'opérations avec d'autres masques et d'autres traitements.

La longueur d'onde de la lumière utilisée pour la projection des masques détermine la taille minimale des éléments du circuit et, donc, la densité de transistors sur le silicium et la vitesse du microprocesseur. Aujourd'hui, on obtient des détails de 0,25 micromètre avec une lumière ultraviolette de longueur d'onde égale à 0,248 micromètre. Quelques équipes prévoient d'employer des longueurs d'onde inférieures à 0,1 micromètre, en utilisant des ultraviolets lointains d'environ 0,013 micromètre de longueur d'onde,

et qui seraient émis par un plasma engendré par un laser.

La focalisation du rayonnement ultraviolet lointain nécessite des miroirs à revêtements multicouches. En outre, la projection des masques avec le niveau de détail souhaité requiert un système de projection de grande précision et une bonne planéité du silicium. Ces caractéristiques devront être testées avec des méthodes capables de détecter des défauts de l'ordre du nanomètre (soit l'épaisseur de cinq à dix atomes seulement).

Seul le rayonnement émis par un anneau de stockage de la nouvelle génération est assez focalisé et assez intense, aux longueurs d'onde des ultraviolets lointains, pour réaliser ces tests. Jeffrey Bokor et ses collègues de l'Université de Berkeley étudient une mé-

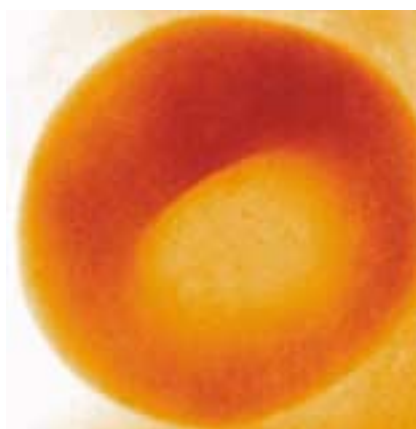
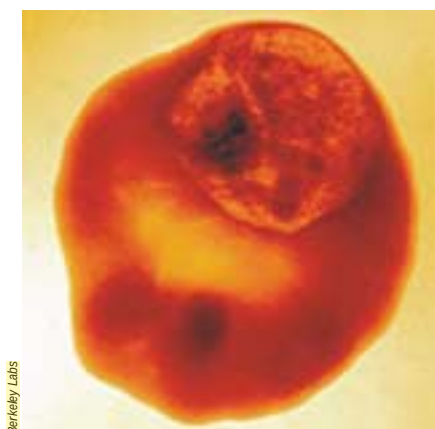
thode de mesure optique de cette précision en utilisant le rayonnement ultraviolet lointain produit par l'ALS. Ils ont construit un interféromètre où la lumière cohérente émise dans un onduleur est divisée en deux faisceaux : l'un est réfléchi par l'élément optique testé, et l'autre passe à travers un trou minuscule, puis ils sont recombinaés. Comme ils n'ont pas parcouru la même trajectoire, ils sont déphasés (un déphasage de 180 degrés, par exemple, positionnerait les maxima d'amplitude de l'onde transportée par un faisceau là où se trouvent les minima de l'onde transportée par l'autre faisceau, et *vice versa*), et des franges d'interférences apparaissent : ces franges contiennent les informations sur les caractéristiques de l'objet étudié. Par cette méthode, J. Bokor et ses collègues ont démontré que l'on peut fabriquer des miroirs d'une précision suffisante pour projeter des images avec des détails de moins de 0,1 micromètre en ultraviolet lointain.

Des liaisons révélées

Avec le rayonnement synchrotron brillant, on observe même des liaisons entre des atomes ou des molécules et une surface, dont la structure commande les réactions chimiques de surface. De telles réactions interviennent, par exemple, dans la corrosion et dans la catalyse, où l'adsorption de molécules sur une surface favorise leur interaction ou leur dissociation.

Anders Nilsson et Nial Wassdahl, de l'Université d'Uppsala, ont ainsi cartographié la position des électrons de liaison dans une molécule de diazote (formée de deux atomes d'azote) adsorbée sur une surface de nickel. Ils espèrent utiliser leurs analyses pour améliorer le rendement de la synthèse d'ammoniaque et d'autres molécules azotées utilisées dans des engrais : l'étape lente du procédé actuel est la dissociation du diazote en deux atomes d'azote.

En ajustant avec précision l'énergie des photons X fournis par l'ALS, on excite sélectivement les électrons de liaison de la molécule sans perturber ceux de la surface du nickel. Lorsqu'un électron ainsi excité revient à son énergie initiale, il peut réémettre un photon X par fluorescence : la distribution en énergie de ces photons de fluorescence X permet de reconstituer la structure énergétique et spatiale des liaisons de la molécule de diazote. Une telle expérience requiert une source très intense de



5. LE PARASITE RESPONSABLE DU PALUDISME est visible avec beaucoup de détails sur cette image aux rayons X d'un globule rouge humain infecté (à gauche). La photographie de droite montre une cellule saine.

SOURCES DE RAYONNEMENT SYNCHROTRON LES PLUS BRILLANTES			
NOM	LIEU	ÉNERGIE DES ÉLECTRONS	MISE EN SERVICE
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)	Grenoble, France	6 GeV	1993
Advanced Light Source (ALS)	Berkeley, Californie	1,5-1,9 GeV	1993
Synchrotron Radiation Research Center (SRRC)	Hsinchu, Taïwan	1,5 GeV	1994
Elettra	Trieste, Italie	2,0-2,4 GeV	1995
Pohang Light Source (PLS)	Pohang, Corée	2-2,5 GeV	1995
Advanced Photon Source (APS)	Argonne, Illinois	7 GeV	1996
MAX II	Lund, Suède	1,5 GeV	1997
SPring-8	Nishi-Harima, Japon	8 GeV	1997
BESSY II	Berlin, Allemagne	0,9-1,9 GeV	1998
Swiss Light Source (SLS)	Villigen, Suisse	2,4 GeV	2001