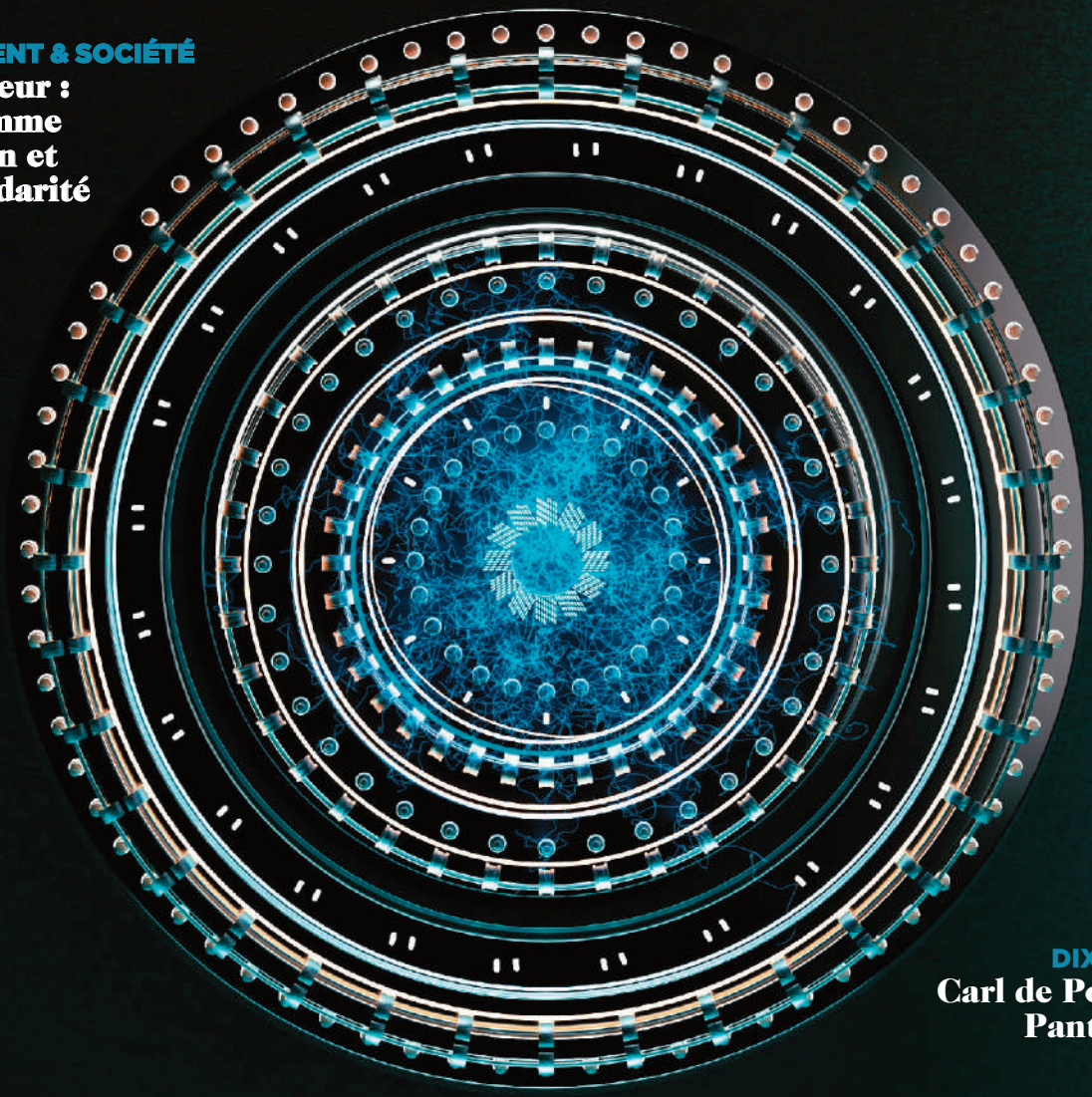
POLYTECHNIQUE ALUMNI

LA JAUNE & LA ROUGE

Novembre 2022 - N° 779 8€

ENVIRONNEMENT & SOCIÉTÉ

Don de Chaleur : l'énergie comme bien commun et objet de solidarité



DIX QUESTIONS À

Carl de Poncins (X99) Panthea-Theatre in Paris

DOSSIER

QUANTIQUE

REPOUSSONS NOTRE HORIZON

PAGE 16

l'X AX ÉCOLE POLYTECHNIQUE ALUMNI

ARMTEK

www.armtek.fr

Brisez
la chaîne des documents papiers

Révolutionnez
la collaboration opérationnelle

Transformez
votre organisation en **exponentielle**

QUANTIQUE

À RETROUVER PAGE 16

LE MOT DU PRÉSIDENT
Marwan Lahoud (X83)
PAGE 5

DOSSIER
QUANTIQUE
Dossier coordonné par Alexandre Krajenbrink (X12) et Elvira Shishenina (X11)
PAGE 16

PAGE 17 — La physique quantique doit devenir un sujet industriel *par Alexandre Krajenbrink (X12) et Elvira Shishenina (X11)*

PAGE 18 — Des labos de l'X au *venture capital*, bâtissons une industrie quantique *par Christophe Jurczak (X89)*

PAGE 23 — Les processus quantiques : la recherche fondamentale vers l'ingénierie *par Loïc Henriet (X09)*

NOUVELLES DU PLATÂL
PAGE 6
LES DERNIÈRES NOUVELLES D'HELEN SANDS (X20)
IKwoman de la Kèsquatoriale
par Helen Sands (X20)

VIE DE L'ASSOCIATION
PAGE 7
Nouvelles de l'association
PAGE 84
Carnet professionnel & carnet polytechnicien

TRAJECTOIRES
PAGE 9
PANTHEA-THEATRE IN PARIS
Placer le spectateur au centre de l'expérience théâtrale
Carl de Poncins (X99), propos recueillis par Hervé Kabla (X84)
PAGE 14
PORTRAIT
Paul Lascombes (X13), construire des choses
par Pierre Laszlo

VIE DES ENTREPRISES
PAGE 46
QUANTIQUE & HPC
PAGE 58
NOUVELLES TECHNOLOGIES & NOUVELLES CARRIÈRES
Cahier réalisé par FFE pour le service commercial de La Jaune et la Rouge

Rendez-vous sur le site de La Jaune et la Rouge
pour accéder aux informations complémentaires, réagir aux articles et consulter les numéros déjà parus.

http://www.lajauneetlarouge.com
Courriel : webmestre@lajauneetlarouge.com
facebook.com/La.Jaune.et.La.Rouge
linkedin.com/company/la-jaune-et-la-rouge

LA JAUNE & LA ROUGE
Novembre 2022
N° 779

PAGE 26 Des ingénieurs quantiques à l'X : un défi pluridisciplinaire
par Landry Bretheau (X05) et Thomas Ayral (X07)

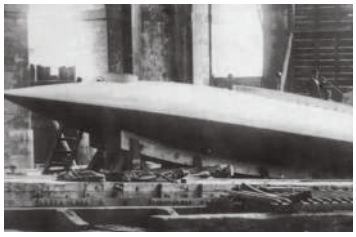
PAGE 30 Les initiatives françaises pour une diplomatie quantique
par Alexandre Krajenbrink (X12) et Elvira Shishenina (X11)

PAGE 34 La souveraineté nationale au sein du plan national quantique
par Neil Abroug

PAGE 36 L'innovation quantique dans le contexte de la culture francophone
par Vincent Aimez

PAGE 40 Le calcul optique : des prémices aux horizons quantiques
par Tristan Gautié (X14)

PAGE 43 Étymologix, à propos du quantique
par Pierre Avenas (X65)



ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

PAGE 66
DON DE CHALEUR : l'énergie comme bien commun et objet de solidarité
par Matthieu Sattler (X16) et Laurent Fournié (X99)

EXPRESSIONS

PAGE 68
MANAGEMENT ET CULTURE NATIONALE
par Michel Matheu (X72)

ARTS, LETTRES ET SCIENCES

PAGE 72
HISTORIX
Une invention polytechnicienne : le sous-marin militaire
par Jacques-André Lesnard

PAGE 78 Musique en images
par Marc Darmon (X83)

PAGE 79 Discographie
par Jean Salmona (X56)

PAGE 80 Cinéma
par Christian Jeanbrau (X63)

PAGE 81 Jeux

PAGE 83 Livres

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION :
Marwan LAHOUD (X83)

RÉDACTEURS EN CHEF :
Alix VERDET
Pierre SÉGUIN (X73)

MAQUETTE :
Anne BOUVIER

CORRECTRICE :
Catherine AUGÉ

ÉDITEUR :
Association des anciens élèves et diplômés de l'École polytechnique
12, rue de Poitiers, 75007 Paris
info@ax.polytechnique.org

COMITÉ ÉDITORIAL :
Michel BERRY (X63), président, Christian MARBACH (X56), président d'honneur, Gérard BLANC (X68), Philippine BURDEAU (X17), Gérard COHEN (X70), Pierre COUVEINHES (X70), Jérôme de DINECHIN (X84), Delphine FAYOL (X06), Hubert JACQUET (X64), Marc JOANNY (E.P.), Pierre LASZLO, Philippe LAURIER (E.P.), Guillaume MAGNIEN (X12), François Xavier MARTIN (X63), Olivier MELLINA-GOTTARDO (X96), Géraldine NAJA (X82), Olivier PASCAL (X72), Valentin PERROUX (X16), Charles-Henri PIN (X56), Helen SANDS (X20), IKwoman.

RÉDACTION DE LA JAUNE ET LA ROUGE :
12, rue de Poitiers, 75007 Paris
jaune-rouge@ax.polytechnique.org

WEBMESTRE :
Anne BOUVIER
webmestre@lajauneetlarouge.com

ABONNEMENTS, ANNUAIRE, COTISATIONS :
annuaire@ax.polytechnique.org

AX CARRIÈRES :
Tél. : 06 43 11 91 08
carrieres@polytechniciens.com

TARIFS 2022 :
Prix du numéro : 8 euros
Abonnement (10 numéros par an) : voir bulletin en page 4

PUBLICITÉ :
FFE – revue-polytechnique.fr
15, rue des Sablons – 75116 Paris
Tél. : 01 53 36 20 40

CONCEPTION :
Philippe ARNO-PONS

IMPRESSION :
Imprimerie CHIRAT
744, rue de Sainte-Colombe
42540 Saint-Just-la-Pendue

COMMISSION PARITAIRE
n° 0124 G 84221 - ISSN n° 0021-5554
TIRAGE : 6 100 exemplaires
N° 779 - Novembre 2022
COUVERTURE : Processeur quantique
© Bartek Wróblewski

LA JAUNE ET LA ROUGE

UN ABONNEMENT UNIQUE REVUE & INTERNET

→ *pour garder le contact avec la* ***communauté polytechnicienne***
→ *pour lire le point de vue des X sur les* ***mutations de la société***
→ *pour suivre l'****évolution de l'École***
→ *pour* ***exprimer ton point de vue***

+ D'INTERVIEWS,
+ D'INFOS,
+ DE RUBRIQUES

UN SITE INTERNET
+ CLAIR,
+ ERGONOMIQUE,
+ DYNAMIQUE

ABONNEZ-VOUS pour un an sur www.lajauneetlarouge.com ou en renvoyant ce bulletin
10 numéros à compter de la date de souscription, donnant accès à tous les articles de l'édition électronique.

☐ **Abonnement 1 an : 60 €**

Tarif préférentiel pour les anciens élèves et diplômés cotisants (consulter le site ax.polytechnique.org, rubrique « Cotiser »).

Nom : ..... Prénom : ..... Promo : .....

Adresse : .....

..... Code postal : ..... Ville : .....

Date : ..... Signature :

AX-Service des abonnements, 12, rue de Poitiers, 75007 Paris. Chèques à libeller à l'ordre de l'AX.

“Le calcul quantique est le prochain graal technologique.”

Le conseil des ministres du 5 octobre 2022 a vu la nomination de notre camarade Laura Chaubard (X99), ou devrais-je dire l’ingénieure générale Laura Chaubard (X99), comme directrice générale de l’École polytechnique.

Je relève, pour ma part, deux points remarquables : comme la plupart des commentateurs, je note que c’est la première femme à occuper ce poste, cinquante ans après la première femme à passer le concours d’entrée. Encore plus remarquable à mon sens est le fait que Laura, bien qu’appartenant de peu à une promotion du siècle dernier, représente la relève. Merci à François Bouchet (X86) pour tout ce qu’il a fait pour l’X et bon vent Laura. Tu peux compter sur l’AX et la communauté polytechnicienne.

Le 4 octobre 2022, le comité Nobel décernait le prix Nobel de physique à trois physiciens, un Autrichien, un Américain et un Français pour leurs travaux sur l’intrication quantique et la violation des inégalités de Bell. Alain Aspect, le lauréat français, est bien connu des polytechniciens depuis le début des années 90. Professeur à l’École, il a inculqué à plus d’une génération ce qu’il appelle les deux miracles quantiques : la dualité onde-corpuscule pour le premier d’entre eux et l’intrication pour le second. Très engagé auprès de nombre d’entrepreneurs, il les soutient dans la quête du prochain graal technologique, le calcul quantique. Bravo Alain !

Cela me donne l’occasion de souligner l’importance de la formation scientifique de haut niveau, marque de fabrique de l’X et de l’interaction continue entre la recherche fondamentale, mathématiques pures, physique théorique, optique quantique… et la technologie, qu’elle soit portée par les laboratoires publics ou privés, les grandes ou les petites entreprises, celles qui sont centenaires et celles qui ont deux mois d’existence.

C’est grâce à cette interaction que les polytechniciens pourront relever les défis que le ministre des Armées, Sébastien Lecornu, a soulignés dans son dernier ordre du jour à l’École polytechnique, le 14 octobre dernier, afin de transformer notre pays.

MARWAN LAHOUD (X83)
président de l’AX

LA MARQUE DE FABRIQUE DE L’ÉCOLE POLYTECHNIQUE

LES DERNIÈRES NOUVELLES D'HELEN SANDS (X20)

IKWOMAN DE LA KÈSQUATORIALE

PAR **HELEN SANDS** (X20), IKWOMAN

© Jean Lefort

© Agathe L'Hermite

↑ Édition 2022 de l'OktoBB.

← Finale victorieuse de hand masculin à la Coupe de l'X.

Aujourd'hui je vous écris les Nouvelles du Platâl pour la dernière fois. En effet, au moment où je vous écris, la campagne Kès est sur le point de commencer et ce sera à mon successeur, Alexis Aubel de l'ArmoriKès ou Sofiane Aïssani de l'OlympiKès, de prendre le relai pour vous conter les aventures toujours innombrables et effarantes des élèves ingénieurs polytechniciens. Mais je n'ai pas dit mon dernier mot et je prends la plume une dernière fois pour vous décrire ce mois d'octobre haut en couleur !

Développer durablement l'écologie sur le Platâl

À commencer par la semaine de l'Écologie à l'X, organisée par le Binet NeXt (association développement durable). De nombreuses activités étaient proposées : un atelier de poterie, un atelier fresque de la biodiversité, une conférence sur les notions de résilience par Magali Reghezza (géographe, codirectrice du Centre de formation sur l'environnement et la société à l'ENS et membre du Haut Conseil pour le Climat), un buffet avec d'anciennes X qui ont choisi un parcours professionnel ou associatif tourné vers l'écologie, une vente de plantes… de quoi plaire à tout le monde et donner au développement durable une place importante dans notre parcours polytechnicien.

Un OktoBB 100 % végétarien et Ecofest

Le premier octobre a eu lieu l'OktoBB : c'est l'un gros festivals de l'X, inspiré du très célèbre Oktoberfest allemand et organisé par les membres de l'Atelier des Ondes (association musique de l'X) et du Binet Binouze (asso bière). De midi à minuit, des bars tenus par plusieurs écoles, des stands de nourriture et une scène avec divers artistes ont permis à environ 1 500 étudiants des alentours de profiter d'une après-midi dans une ambiance détendue et festive. Témoignage de Sofiane, aspi iK de l'OlympiKès : « L'OktoBB 2022 a été un événement intéressant à bien des égards ! D'une part parce qu'il a permis de regrouper des étudiants de toute la région afin d'encourager un partage de talents fructueux pour nos vies associatives. D'autre part car il a été innovant et responsable : 100 % végétarien et labellisé Ecofest. Je suis particulièrement reconnaissant envers toutes les associations impliquées dans ce festival pour leur travail, qui m'a permis de passer un super samedi ! »

Succès de la Nuit du Styx et de X Forum

Ensuite nous avons enchaîné avec la Nuit du Styx le 4 octobre, qui est l'une des plus grandes soirées étudiantes de France. C'est la dernière grande soirée organisée par le Binet Styx avant que celui-ci soit passé à la promotion suivante, et elle se tient dans le grand hall sous les projecteurs d'une gigantesque structure prévue à cet effet. Le thème cette année : les pyramides mayas !

De façon beaucoup plus sérieuse, les 11 et 12 octobre s'est tenu le X Forum organisé par l'association du même nom. Le 11 octobre, pour la Journée Carrières, plusieurs entreprises ont pu proposer des ateliers et relectures de CV aux étudiants, puis le 12 octobre plus de 150 entreprises étaient présentes afin de se présenter aux élèves et de rencontrer près de 1 000 polytechniciennes et polytechniciens.

La Coupe de l'X

Et le 13 octobre nous avons tous eu la chance de participer ou d'encourager nos camarades à la Coupe de l'X, le grand tournoi inter-écoles organisée par le BDS (Bureau des Sports) de l'X et rassemblant 17 disciplines sportives et environ 2 000 élèves de 19 écoles différentes. Alexis Aubel, aspi iK de l'ArmoriKès, témoigne : « La Coupe de l'X est un événement majeur pour les promotions. C'est pour certains l'une des rares occasions de pratiquer leur sport en compétition, mais c'est avant tout pour tous l'occasion de rassembler les sections qui viennent soutenir leur équipe et les équipes de l'X en général. Plus qu'un événement sportif, la Coupe de l'X est un événement fédérateur. Et puis la bonne surprise de cet événement, c'est que cette compétition entre écoles n'a pas empêché de découvrir et d'apprendre à connaître des gens d'autres écoles, que ce soit autour d'un match, d'une crêpe ou d'une bière. Par ailleurs, cela a aussi et surtout été l'occasion de retrouver ses potes de prépa autour d'un événement autre qu'une soirée. Et, en plus, ça a fait plaisir : on a pu suivre beaucoup d'équipes de l'X toute la journée jusqu'en finale (il faut croire que jouer à domicile, ça aide). »

Retrouve la suite sur https://www.lajauneetlarouge.com/

© demerzel21

X MÉMORIAL

X-Mémorial vous invite, ainsi que vos proches et vos amis, à participer aux cérémonies du souvenir des anciens élèves de l'École décédés dans l'année, animées par le chœur de l'Ensemble vocal de l'École polytechnique.

Vendredi 11 novembre 2022 à 17 h 15 : temps de prière après l'office du shabbat, présidé par le Grand Rabbin de France Haïm Korsia (D13), aumônier de l'École, à la synagogue ACCI-16, 14, avenue du général Mangin, 75016 Paris.

Samedi 19 novembre 2022 avec la participation d'un détachement d'élèves et du chœur de l'Ensemble vocal de l'École polytechnique, dirigé par maître Patrice Holiner : à 10 h, dépôt de gerbe au Monument aux polytechniciens morts pour la France dans l'enceinte de l'ancienne École au 21, rue Descartes, Paris 5e, qui sera suivi de la messe annuelle à 10 h 30 en l'église Saint-Étienne-du-Mont, Paris 5e, présidée par le père Erwan Chauty (X94) s.j. et concélébrée par le père Gonzague Lalanne-Berdouticq s.j., aumônier de l'École, et par des prêtres polytechniciens. Mention sera faite de tous les polytechniciens dont le décès a été connu depuis la messe de novembre 2021 et nous prierons aussi aux intentions de toute la communauté polytechnicienne.

http://xmemorial.fr

Apér'Orientation : les métiers et l'industrie de la Défense

L'apér'Orientation sur les métiers civils de la Défense, organisé par la Kès 2020 et l'AX, aura lieu le mardi 15 novembre à 19 h 15 au Titus à côté du Bôbar.

AX CARRIÈRES

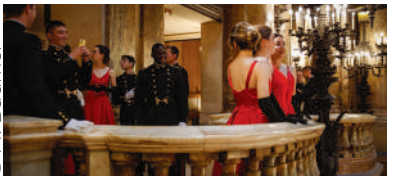
Atelier « LinkedIn à l'international » le mercredi 16 novembre de 18 h 30 à 20 h 30 en visioconférence animé par Élisabeth Giret-Bertrand, experte de la gestion de carrière à l'international.

Atelier « Se mettre à son compte » le mercredi 23 novembre de 18 h à 20 h en visioconférence animé par Olivier de Conihout (X76), fondateur de l'Espace dirigeants.

Petit-déjeuner polytechnicien

Le prochain invité des petits-déjeuners polytechniciens est Benoît Bazin X89, directeur général de Saint-Gobain, le mercredi 30 novembre de 8 h 30 à 10 h à la Maison des polytechniciens, 12, rue de Poitiers, 75007 Paris.

Ouverture des réservations en ligne le 15 décembre 2022.


© M. Baumer

BAL DE L'X 2023

L'édition 2023 du Bal de l'X aura lieu le vendredi 12 mai au Palais Garnier. Ouverture des réservations en ligne le 15 décembre 2022.

X Aviation

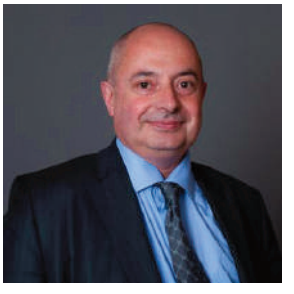
Visite du centre d'essais des propulseurs de la DGA à Saclay le mercredi 9 novembre de 8 h 45 à 14 h 30.

AX CHINE

Dîner d'entrepreneurs du groupe AX Chine avec Pierre Poignant (X98), cofondateur de Branded, le mardi 15 novembre au Poulpry à la Maison des polytechniciens à 19 h.

X Santé Biotech

Conférence mardi 15 novembre de 19 h à 21 h sur le thème « Nos arrière-petits-enfants ne se reproduiront pas comme nous. Perspectives sur l'évolution de la reproduction humaine au vu des récentes avancées technologiques » par Israël Nisand, professeur de gynécologie obstétrique et directeur de la maternité de l'hôpital américain, au 262, rue du Faubourg Saint-Honoré, 75008 Paris.



X RECHERCHE

Conférence du groupe X Recherche « Quelle recherche pour la défense ? Nouveaux défis, nouveaux enjeux » à la Maison des polytechniciens le 15 novembre 2022 à 18 h 45.

Les objectifs de supériorité opérationnelle des armées et d'autonomie stratégique impliquent de développer des armements toujours plus performants incorporant des technologies de pointe, nécessitant de consacrer des crédits importants à la R & T de défense. Cette politique menée par la France depuis plus de 50 ans conduit à créer un écosystème dont les règles de fonctionnement s'écartent de celles du secteur civil.

La R & T de défense est aujourd'hui soumise aux nouveaux défis que constituent l'utilisation de technologies à application duale, la perspective de voir naître des technologies de rupture ou l'européanisation du domaine de l'armement.

Jean-Pierre Maulny, directeur adjoint de l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS) et du réseau de chercheurs européens ARES Group (Armament Industry European Research Group), nous exposera ces nouveaux défis auxquels la R & T de défense est confrontée.

Entrée libre, inscription auprès de philippe.auroy@polytechnique.org

Renseignements et inscriptions sur le site de l'AX ax.polytechnique.org

X FINANCE

Déjeuner avec Jean-Paul Mazoyer, directeur général adjoint du groupe Crédit Agricole et président du conseil de direction cartes bancaires CB, le vendredi 18 novembre de 12 h 30 à 14 h 30.

© Jag_cz

Régate interpromo 2022

La régate interpromo 2022 se tiendra à La-Trinité-sur-Mer le week-end des 19 et 20 novembre à bord des Grand Surprise de Team Winds, pour une régate de deux jours encadrée par la SNT.

X Défense

Déjeuner avec Alexandre Papaemmanuel sur le thème « L'avenir de l'anticipation stratégique », le jeudi 1er décembre au Poulpry.

X Vinicole

11e rencontres œnophiles des grandes écoles dimanche 4 décembre de 10 h 30 à 19 h à la Maison des polytechniciens, 12, rue de Poitiers, 75007 Paris.

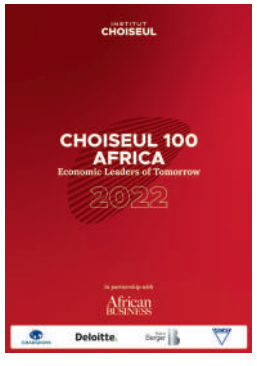
X Space

Visite du site Airbus Defence & Space de Stevenage, à 30 min au nord de Londres, le lundi 5 décembre de 10 h à 16 h.

ENSEMBLE VOCAL DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Concert de l'ensemble vocal de l'École polytechnique le vendredi 9 décembre à Saint-Germain-des-Prés à 20 h 30. Accompagné de l'orchestre Via Luce et sous la direction de Maître Patrice Holiner, ils interpréteront le *Requiem* de Verdi.

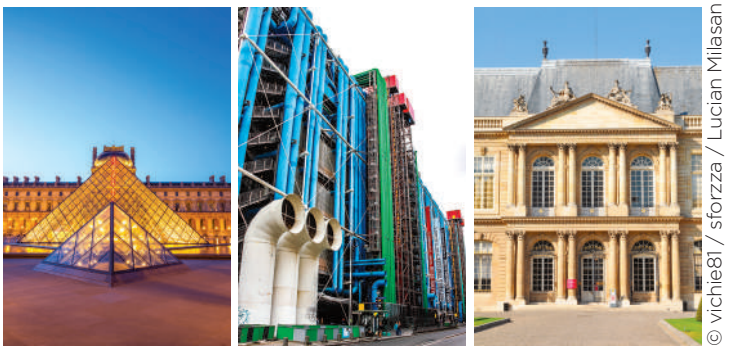
Réservation *via* ce QR code :



LES POLYTECHNICIENS DU CLASSEMENT CHOISEUL 100 AFRICA 2022

Félicitations à Mamadou Fall Kane (E17), secrétaire permanent adjoint au Comité d'orientation stratégique pour le pétrole et le gaz & conseiller énergie du président de la République du Sénégal, à Iheb Triki (X05), cofondateur et PDG de Kumulus-Water, à Mehdi Bennouna (X03), directeur général de Mutandis, à Anne-Catherine Tchokonté (X07), directrice générale de Orange Money Cameroon, et à Elyes Jeribi (X03), PDG de Julia Group, pour leur sélection dans le classement Choiseul 100 Africa « Economic Leaders for Tomorow » 2022.

Renseignements et inscriptions sur ax.polytechnique.org



© vichie81 / sforzza / Lucian Milasan

GPX

Le secrétariat du GPX change de numéro de téléphone et peut être joint au 07 87 89 49 52. Le numéro « historique » (01 45 48 52 04) ne doit plus être utilisé.

Assemblée générale ordinaire lundi 14 novembre à 18 h 30, à la maison des X, salon Aigle, suivie d'une assemblée générale extraordinaire pour modifier les statuts et unifier les catégories de membres. Le dîner de rentrée suivra à 20h.

Activités culturelles (novembre-décembre)

- Vidéoconférences : « Le palais des Archives nationales » le 16 novembre ; « Dante et son influence posthume sur l'art » le 22 novembre ; « L'argent dans l'art » le 29 novembre ; « Le palais du Louvre » le 7 décembre.
- « Alice Neel » visite au Centre Pompidou le 7 décembre.
- Exposition « Les choses » visite au Louvre le 14 décembre.

Théâtre

- *Le Menteur*, jusqu'à Noël, Poche Montparnasse.
- *Le secret de Sherlock Holmes*, jusqu'au 30 novembre, Théâtre La Bruyère.
- *Un chalet à Gstaad*, les 1er et 18 décembre, Théâtre des Nouveautés.
- *Berlin Berlin*, les 8 et 11 décembre, Théâtre Fontaine.
- *Une situation délicate*, le 15 décembre, Théâtre Édouard-VII.

Bridge

- Tournois de régularité : les 4 et 7 novembre.
- Ronde de France : les 14, 21, 25 et 28 novembre.
- Tournoi Patton : le 18 novembre.

Randonnées

Cesson-Savigny-le-Temple, le dimanche 20 novembre.

Voyages à venir

Voir sur le site du GPX.

Œnologie

Le groupe œnologie étant complet, nous étudions la possibilité d'en constituer un second : merci de signaler votre intérêt au secrétariat.

Le secrétariat du GPX vous accueille tous les matins dans son bureau rue de Poitiers (2e étage).

Pour toute information sur le programme d'activités et pour les inscriptions, www.gpx.polytechnique.org, par e-mail gpx@polytechnique.org ou par téléphone 07 87 89 49 52.

PANTHEA-THEATRE IN PARIS

PLACER LE SPECTATEUR AU CENTRE DE L'EXPÉRIENCE THÉÂTRALE

© Audray Saulem

Carl de Poncins *(X99)*

–

PROPOS RECUEILLIS PAR **HERVÉ KABLA** (X84)

En 2014, Carl de Poncins (X99) a cofondé Panthea-Theatre in Paris, qu'il préside. Leader européen des solutions de surtitrage pour le spectacle vivant, Panthea propose des services complets de surtitrage, qui incluent le découpage et la traduction des surtitres, l'implantation technique sur place, ainsi que les différentes prestations pendant les représentations. Panthea gère également Theatreinparis.com, un site de billetterie en ligne pour les spectateurs internationaux à Paris, la ville la plus visitée d'Europe.

Quelle est l'activité de la société Panthea-Theatre in Paris ?

Nous avons deux activités, l'une BtoB et l'autre BtoC. Sous la marque Panthea, nous avons développé une activité de services et matériels de sous-titrage à destination des producteurs, théâtres, opéras et festivals. Nous leur fournissons les écrans de projection, des traductions de grande qualité grâce à l'utilisation d'un logiciel que nous avons développé sur mesure, et enfin les opérateurs de régie qui, concrètement, sont ceux qui font défiler le sous-titrage lors du spectacle, à l'aide du même logiciel.

Nous avons également développé un service révolutionnaire permettant le sous-titrage individualisé sur appareils mobiles, notamment sur des lunettes connectées. Dans ce cas, les sous-titres apparaissent dans les lunettes, ce qui permet à chaque spectateur de profiter du spectacle dans sa langue, avec un affichage personnalisé dans son champ de vision, sans déranger les autres spectateurs dans la salle. Nous avons été les tout premiers à mettre sur le marché une telle solution pour le théâtre. C'est un art particulièrement adapté à ce système de réalité augmentée, car le spectateur a besoin de garder les yeux sur la scène pour rester concentré et profiter pleinement de l'expérience. Les lunettes connectées permettent donc un gain en confort important par rapport à des écrans classiques.

En parallèle, nous gérons une activité BtoC sous le nom « Theatre in Paris ». Theatreinparis.com est un site de billetterie permettant de réserver des spectacles parisiens accessibles à tous, Français comme étrangers. Nous proposons notamment opéras, concerts de musique classique, jazz, et des pièces de théâtre en français sous-titrées en anglais pour le public anglophone. Le site est disponible en anglais et en français, et nous soignons tout particulièrement le service client pour être au niveau des standards des spectateurs venus du monde entier qui ne connaissent pas toujours les codes des salles de spectacle françaises, mais aussi pour la clientèle française exigeante.

Quel est le parcours des fondateurs ?

Nous sommes trois associés à l'origine du projet : Christophe Plotard, journaliste dans le secteur du tourisme, Romain Beytout, chanteur d'opéra, et moi-même, X99 ayant travaillé dix ans dans l'innovation dans de grands groupes industriels. Nous nous sommes rencontrés au conservatoire de Levallois où nous chantions ensemble dans le Jeune Chœur d'Île-de-France. Malgré la diversité de nos parcours, nous étions réunis par l'amour du chant en particulier, et du monde du spectacle en général. Pour ma part, j'avais acquis de premières expériences dans la conduite de projets innovants, puis dans la gestion d'un portefeuille d'innovations. À un moment donné, je me suis dit que, après avoir mené ces projets d'innovation au service d'actionnaires, j'avais envie de le faire de façon autonome, en créant ma propre entreprise.

En 2016, nous avons fusionné avec une agence allemande spécialisée dans le sous-titrage de théâtre, ce qui nous a amenés à être rejoints par deux associés berlinois : David Mass et Anna Kasten. Aujourd'hui, Panthea est donc présent à Paris et à Berlin. Cette expansion à l'international, et en Allemagne en particulier, fait écho à mon parcours, car j'ai effectué mon école d'application à l'université allemande d'Aix-la-Chapelle, la RWTH. Du génie industriel et automobile au monde du spectacle, il y avait un long chemin, mais c'est finalement la langue allemande et le goût de l'innovation qui en ont été le fil directeur.

Comment t'est venue l'idée ?

L'idée est née de discussions avec Nicolas Lormeau, sociétaire de la Comédie-Française, en 2013. Il nous avait raconté son expérience de tournées en Russie et en Chine, et je cite de mémoire : « Nous jouions une comédie de Feydeau en français à Moscou, et la salle riait plus qu'en France ! » Intrigué par cette expérience au-delà des frontières, j'en ai parlé avec deux amis du conservatoire et après quelques bières nous avons décidé de creuser cette question : et si, avec des sous-titres anglais, il était possible d'ouvrir le théâtre français au public international ? Par la suite, nous avons élargi le concept pour proposer une billetterie qui place le spectateur au centre de l'expérience, avec un soin particulier apporté au service client. Nous avons diversifié notre offre pour référencer tous les spectacles accessibles aux étrangers, puis avons ouvert une version en français du site Theatreinparis.com, pour que les clients francophones, ou partiellement francophones, ou simplement à la recherche d'un site plus personnalisé et premium que les grandes billetteries, trouvent leur bonheur.

Très vite, nous avons identifié le besoin d'améliorer et numériser les outils dédiés à la traduction pour le monde du spectacle, afin de gérer les volumes grandissants. L'un de nos partenaires, la Schaubühne de Berlin, dirigée par Thomas Ostermeier, est par exemple l'une des plus grandes scènes au monde pour le théâtre contemporain. Leurs spectacles tournent littéralement dans le monde entier. Il pouvait donc exister, pour un spectacle donné, jusqu'à 9 fichiers de sous-titres dans des langues différentes et parfois sous des format différents (PowerPoint, format texte…). Si une scène de ce spectacle était modifiée un jour aux États-Unis, elle devait être adaptée également pour la représentation de la semaine suivante en Corée du Sud… un véritable enfer de traitement manuel.

Lauréats du Concours d'innovation numérique du ministère de l'Économie, nous avons développé un logiciel appelé Spectitular® qui est devenu une plateforme SaaS présentant tous les avantages du *cloud* : collaborative, multilingue, multisupport. Nous apportons un vrai professionnalisme dans l'art du « surtitrage » (le nom donné au sous-titrage dans le théâtre et l'opéra), qui est un métier qui était peu reconnu jusqu'alors.

© Alexis Pichot

↑ *Le Mensonge* de Florian Zeller, Théâtre Édouard-VII, 2015.

Qui sont les concurrents ?

Du côté de l'activité de sous-titrage, il existe quelques agences historiques qui sont pour la plupart locales et liées à un lieu emblématique : 36caracteres en Espagne et le Teatro Real de Madrid ; Prescott Studio en Italie et la Scala de Milan ; ou encore Stagetext au Royaume-Uni qui a le statut de *charity*. Nous nous différencions par une offre complète, combinant la location-vente de matériel (écrans, lunettes connectées), le logiciel, la création des contenus et l'opération – qui pourrait paraître simple mais qui en réalité demande une expertise très pointue – consistant à faire défiler les sous-titres pendant les représentations. Aujourd'hui nous disposons d'un réseau unique au monde de près d'une centaine de traducteurs et opérateurs multilingues. Notre objectif est vraiment qu'un maximum de spectacles soient accessibles au plus grand nombre grâce au sous-titrage.

Pour la branche BtoC, dans la billetterie internationale, les grands acteurs sont TripAdvisor (*via* sa filiale Viator) et GetYourGuide, une start-up allemande. Ce sont les grands supermarchés internationaux des activités touristiques. Toutefois, au-delà des grands incontournables tels que bateaux-mouches, statue de la Liberté, tour Eiffel, etc., il est difficile de trouver sur ces sites des propositions qui sortent des sentiers battus. C'est sur ce créneau que nous nous positionnons à Paris. Dans la billetterie française, les leaders sont bien connus : Fnac, Billetreduc, Ticketac, Theatreonline. Là aussi, notre spécificité est claire : outre une navigation entièrement pensée pour un visiteur occasionnel international, nous proposons un service d'épicerie fine. Sur Theatreinparis.com, vous pouvez ainsi découvrir une sélection de spectacles choisis, un service client personnalisé et bilingue, avec un travail soigné de mise en valeur de la centaine de spectacles référencés.

Quelles ont été les étapes clés depuis la création ?

Dès 2014, à la création du site Theatreinparis.com, nous avons connu une réception enthousiaste du marché et de l'écosystème. Cela nous a permis de défendre une marque BtoC très tôt dans un secteur touristique peu propice à l'émergence d'idées innovantes, puis de lever des fonds et de continuer notre développement. Fin 2016, la fusion évoquée précédemment avec l'Allemagne nous a permis de développer une branche BtoB proposant aux théâtres, opéras et festivals à travers le monde des services de traduction et de sous-titrage, une niche sur laquelle nous sommes désormais leader avec plus de 150 clients partenaires dans toute l'Europe et au-delà : Opéra de Berlin, Festival de Salzbourg, Théâtre national de Bretagne, Odéon Théâtre de l'Europe, Théâtre national de Bruxelles, Schaubühne de Berlin, et bien d'autres. Récemment, nous avons équipé le Teatro Stabile de Turin en Italie, le Théâtre français de Toronto au Canada et bientôt le Royal Opera House à Londres.

Nous avons également développé des solutions technologiques innovantes (on ne se refait pas !) en étant les premiers au monde à proposer le sous-titrage multilingue sur appareils mobiles, notamment sur lunettes de réalité augmentée. Cette technologie, qui permet une personnalisation de l'expérience et un confort de lecture inégalé, est déployée régulièrement dans des festivals et dans des lieux pionniers souhaitant offrir un service d'accessibilité innovant. Nous l'avons déployé sur des spectacles du festival « IN » d'Avignon, notamment sur la scène iconique de la cour d'honneur du palais des Papes. Cette saison, l'Opéra de Lille s'est également équipé de lunettes de réalité augmentée pour proposer, en complément du sous-titrage traditionnel sur écrans, des sous-titres en néerlandais ou en français adaptés aux sourds et malentendants. Concrètement le →

spectateur sourd ou malentendant voit dans ses lunettes une personne qui parle en langue des signes. C'est un progrès important pour cette grande maison publique qu'est l'Opéra de Lille dans sa volonté d'être accessible au plus grand nombre !

Les 24 derniers mois ont été difficiles pour le monde du spectacle. Comment s'est passée la reprise ?

Pour dire les choses sans détour : nous sortons de deux ans de cauchemar. Quand vos clients et vos fournisseurs (touristes et théâtres) disparaissent simultanément, il ne vous reste que vos yeux pour pleurer… Heureusement, nous avons pu bénéficier d'une combinaison de deux facteurs : d'une part, notre structure financière solide avec des actionnaires et des banques fidèles, et une trésorerie importante en début de crise ; d'autre part, des aides publiques massives. Dès que les théâtres ont rouvert leurs portes de façon pérenne et que les voyageurs internationaux sont revenus, nous avons donc pu recommencer à accueillir des spectateurs et à fournir nos services avec une montée en puissance au cours de la saison 2021-2022. Nous avons constaté un retour des voyageurs internationaux et une intensification des propositions de la part des salles de spectacle. Mais c'est véritablement en septembre 2021 que les choses sérieuses ont recommencé. Entre les spectacles décalés, les nouveautés et l'envie farouche de rouvrir, il y a eu un embouteillage de propositions et nous avons dû passer en quelques jours de l'hibernation à l'hyperactivité. Ce n'était pas évident pour les nerfs, même si ce sont de bien meilleurs problèmes que ceux qui consistaient à survivre sans eau dans le désert. Et nous avons pu constater que le travail réalisé pendant la crise portait ses fruits : notre réputation est intacte et nous avons gagné de nouveaux partenaires grâce à la qualité du travail de nos équipes et au bouche à oreille. Si nous parvenons à gérer habilement cette nouvelle montée en charge, nous prévoyons de gagner des parts de marché et donc de surperformer par rapport à notre secteur. Et maintenant nous avons cinq ans pour rembourser notre dette Covid…

La quasi-disparition des touristes à Paris vous a-t-elle contraints à revoir le* business plan *initial ?

Passé le moment de sidération du début du confinement (« Nous sommes en guerre, etc. »), nous avons mené deux actions : sécuriser financièrement l'entreprise et adapter notre activité à la nouvelle réalité. Sur le premier point, le travail a été intense mais somme toute assez classique : recherche d'aides diverses, endettement, réduction provisoire des coûts… En revanche, pour adapter notre activité, c'était beaucoup plus compliqué. Comme je l'ai déjà dit, quand vous n'avez plus ni clients ni fournisseurs, vous êtes en état de mort cérébrale. Nous avons finalement mis en œuvre deux décisions complémentaires : à court terme, accompagner nos partenaires pour numériser leur offre. Nous avons ainsi sous-titré des spectacles joués sur Zoom comme *Splendid's* de Jean Genet au Théâtre national de Bretagne ou sur Instagram comme *_jeanne_dark_* de Marion Siéfert. Nous avons également coordonné des conférences multilingues pour des festivals se tenant entièrement à distance. Et à moyen terme, grâce à notre solidité financière et à nos fonds propres élevés, nous avons continué à perfectionner notre logiciel de sous-titrage et notre site de billetterie. L'objectif était d'être prêts à la reprise et de gagner des parts de marché. Notre *business plan* a ainsi été décalé de deux ans, mais la reprise est très dynamique, supérieure à la situation précrise. Et, lorsque les touristes reviennent, nous avons une meilleure offre à leur proposer.

> *"La reprise est très dynamique, supérieure à la situation précrise."*

Comment lutter contre des concurrents qui se nomment Netflix, Amazon, Disney, UGC ou Gaumont ?

Les études d'opinion indiquent que le retour au spectacle sera certes lent, mais avec un désir accru de sorties. Rien n'indique qu'un « retour à la normale » ne se fera pas. Autrement dit, le remplacement d'un divertissement expérientiel par un divertissement à la maison n'aura pas lieu. On le constatait déjà depuis quelques années dans l'industrie musicale, où les concerts ont toujours plus de succès alors qu'on peut écouter à tout moment son artiste préféré sur une plateforme de streaming. Le streaming n'a pas tué les concerts, il est devenu une source de revenus et un outil de marketing pour attirer les spectateurs en salle. Je prédis le même destin au numérique pour le théâtre et l'opéra. Ce que nous imaginons, c'est que l'offre de divertissement va devenir toujours plus hybride, avec une forte valorisation de l'événementiel, enrichi par une expérience prolongée avant, pendant et après le spectacle, et avec une personnalisation accrue.

Dans un autre registre, je suis devenu en 2021 trésorier de Fedora, la plateforme européenne de promotion de l'innovation dans l'opéra et le ballet. Fedora a pour objectif d'aider à la transformation de cette industrie qui est en danger de mort. Cela passe par des prix prestigieux, les plus grands prix au monde pour le ballet et l'opéra, soutenus par de grands mécènes, mais aussi par une nouvelle initiative baptisée Next Stage qui a pour but de soutenir financièrement des projets de transformation des maisons d'opéra selon 3 axes : le développement durable, le numérique et la diversité. Ainsi Fedora s'attache à défendre la beauté et l'excellence,

avec une dimension sociale et politique assumée. Il faut que ces merveilleux arts vivants entrent chez les gens par les portes, les fenêtres et tous les moyens possibles, car cela peut véritablement changer leur vie.

Le secteur du cinéma a entrepris une numérisation lente, qui permet aujourd'hui de choisir sa place ou de partager l'achat de billets (appli Gaumont Pathé, par exemple). Cela arrivera-t-il dans l'univers du théâtre ?

Le plus difficile est d'éviter ce que j'appelle « l'effet gadget » : une nouvelle technologie émerge, et tout l'écosystème se précipite dessus en vous expliquant que ce sera le nouveau standard. Or j'ai appris de mes années dans l'automobile qu'il existe un outil essentiel qui doit être au cœur de toute innovation : l'analyse fonctionnelle. Cette analyse permet de décrire le besoin du client dans toutes ses dimensions et de concevoir des solutions qui répondent à ce besoin – et non de pousser à tout prix le dernier gadget à la mode sans se soucier de savoir s'il sert à quelque chose.

Cela étant posé, des innovations dans la billetterie sont attendues depuis trop longtemps et devraient arriver à plus ou moins court terme : généralisation du choix de la place sur plan, simulation de la visibilité de la scène, de l'espace pour les jambes, du volume sonore. En ce qui concerne les fonctionnalités de e-commerce, il y a des possibilités de partage d'achat de places comme tu le dis, mais aussi de sécurisation *via* les chaînes de blocs, notamment pour les événements très demandés. Toutes ces innovations visent à rendre le parcours d'achat plus simple, plus fluide, plus confortable, et à apporter de la réassurance, concept clé de la vente de billets de spectacle à distance. Tout ce qui va dans ce sens nous va bien ! Nous sommes un bon cobaye pour ce type d'innovation, car nous parlons à beaucoup d'acteurs différents, avec des clients dans le monde entier.

La remise des César 2021 a laissé un goût assez aigre dans la bouche d'une grande partie du public, alors que des films et spectacles d'excellente qualité ont été produits ces derniers mois malgré les conditions difficiles. Comment expliques-tu cette dérive incompréhensible aux yeux des profanes ?

Le milieu culturel est un secteur absolument incroyable, très proche de celui de l'entrepreneuriat et des start-up : on y rencontre des génies, ayant un goût du risque et de l'aventure bien au-dessus de la moyenne, et une multitude de gens qui veulent vivre de leur passion et créer quelque chose à partir d'une feuille blanche. C'est extrêmement énergisant ! Toutefois, le revers de la médaille est une nécrose qui atteint le secteur, un embourgeoisement lié à des prébendes, un entre-soi mortifère. De mon point de vue, la cérémonie des César 2021 a été le sommet de cette absurdité : une petite communauté d'aigris qui ne parlent qu'à eux-mêmes et à leur ministère de tutelle et qui s'entredévorent. Cela m'a fait beaucoup de peine. Ma conviction est que chaque partie prenante de cet univers doit se secouer les puces pour sortir de l'impasse. Et d'abord, avant tout et obsessionnellement, se concentrer sur le beau. Pour les spectateurs, s'astreindre à ne pas se laisser gagner par les passions tristes et addictives consistant à regarder, avec un regard atterré, les prises de parole les plus négatives. Oser prendre des risques en se laissant de temps en temps surprendre par des nouveautés, des styles auxquels on n'est pas habitué. Se laisser séduire, en somme. Pour les créateurs, ne pas s'enfermer dans des revendications bourgeoises et conservatrices aux antipodes de ce en quoi on croit, et proposer toujours un regard positif, décalé, je dirais même espiègle, sur le monde. « Enfourcher le tigre », pour reprendre une expression chinoise employée par notre Président de la République en 2020. Pour les décideurs politiques enfin, avoir une véritable politique culturelle pensée et assumée, comme ne l'a… pas fait notre Président de la République, ni aucun de ses prédécesseurs depuis François Mitterrand. Ou bien s'autodissoudre, si on ne sert à rien ! Car faire de la politique, de mon point de vue, c'est faire des choix et orienter le bien commun. Et la culture est un champ politique, jusque dans le divertissement (Netflix, Disney ou Pathé ? Ou des bibliothèques publiques ? La langue française ou le globish ?…) mais aussi dans les choix de langue (*La Princesse de Clèves* ou Booba ? *Zadig* de Voltaire, ou Zadig et Voltaire ? Français classique ou écriture dite inclusive ?). L'un des artistes que j'admire le plus, Wajdi Mouawad, le directeur du Théâtre national de la Colline, aborde ces questions avec la meilleure approche qui soit : avec un regard de poète. Je vous recommande chaleureusement son manifeste de mai 2021 intitulé *Fasciite nécrosante*, c'est brillant d'intelligence et de finesse. Et, si vous avez l'âme plus vagabonde, plongez-vous dans son *Manifeste pour l'ombre*. Appelez-moi si vous ne versez pas une petite larme, c'est tout simplement magnifique !

Références :

Theatre in Paris : www.theatreinparis.com

Panthea : www.panthea.com

Fedora : www.fedora-platform.com

Wajdi Mouawad *Fasciite nécrosante* : www.colline.fr/manifeste-de-wajdi-mouawad-mai-2021

Wajdi Mouawad *Pour l'ombre* : www.colline.fr/manifeste-2020

PAUL LASCOMBES (X13)
CONSTRUIRE DES CHOSES

PAR **PIERRE LASZLO**

Paul Lascombes a été nommé dans la catégorie *30 Under 30* – Europe par Forbes. La start-up qu'il a cofondée se nomme Exotrail. Elle développe et commercialise des moteurs pour satellite de petite taille. Ses petits propulseurs à effet Hall permettent aux satellites de changer d'altitude en fonction des missions attribuées, voire de revenir dans l'atmosphère pour ne pas polluer l'espace.

Paul Lascombes illustre ce qu'est l'imagination créatrice : un moteur électrique à propulsion ionique, primé par l'École en 2015, le mène à fonder en 2017 une start-up avec actuellement une petite centaine de salariés fabriquant et opérant des satellites. M'ont impressionné chez ce sage de moins de 30 ans la lucidité, la hauteur de vue et sa réalisation du rêve de bien des élèves de l'École : créer une entreprise. Lui et moi avons les mêmes initiales, peut-être fut-ce l'origine d'une immédiate sympathie réciproque ! J'ai pu rencontrer Paul Lascombes juste avant son départ pour une réunion scientifique et technique (500 participants) à Boston, sur la propulsion électrique. Il y était invité à participer à un *panel* (table ronde, en français !).

Volley et gendarmerie à l'École

Il est originaire de Tarbes, a des parents ingénieur et pharmacienne, un frère aîné, qui le précéda de deux ans à l'X, à présent ingénieur chez Airbus. Néanmoins, Baptiste et Paul ne sont pas si proches. Les parents, en revanche, eurent un rôle majeur d'initiateurs du culturel. Il fit sa prépa à Toulouse, dans ce grand lycée réputé : Pierre-de-Fermat. Ils furent vingt de sa prépa à intégrer l'X ; dans son cas, la seule des meilleures grandes écoles dont il réussit le concours. Sur le Platâl, ce brun de grande taille (1 m 92) choisit le volley comme section sportive. Son commandant de compagnie lors de l'incorporation venait de la gendarmerie. Coïncidence non fortuite, Paul fit son service national dans la gendarmerie, à Pau. Comme il est randonneur et skieur, la gendarmerie de haute montagne lui plut intensément. Plus généralement, la gendarmerie – cette arme très ancienne mais étonnamment moderne – exerça une séduction majeure sur la promo. D'ailleurs une camarade de promotion, Sarah Pétroff (X13), déclina le corps des Mines pour devenir officier de gendarmerie (on peut lire sa contribution au dossier du récent numéro 778 de notre revue). Pour conclure cet aspect de sa biographie, Paul, tenté un temps par le corps de l'Armement, encadra une section d'X15 à La Courtine.

La découverte des USA

Après l'École, en compagnie de deux autres X, Paul fut stagiaire à Payerne, au bord du lac de Neuchâtel, chez *Swiss Space Systems*. Cette start-up vaudoise (2012-2017) faisait faillite. Mais ce stage fut extrêmement formateur pour lui. Autre stage formateur, cinq mois durant, à Caltech, à Pasadena au-dessus de Los Angeles, « intense, mais pas forcené ». Paul apprécia beaucoup l'ambiance du laboratoire où il se trouvait sous la supervision d'un X99. Il profita de ce séjour pour découvrir les USA. Il en aime les parcs nationaux. Ainsi de Yellowstone, qu'il estime à juste titre une splendeur. Il goûta aussi énormément ceux proches de Salt Lake City : Canyonlands, Arches, Bryce, Zion.

"Un moteur électrique à propulsion ionique."

Lecture, théâtre et vins dans la vie

Paul est marié ; il épousa une juriste, qui travaille à la Banque de France. Ils se connaissent depuis une bonne décennie, c'est une amie d'adolescence. Grand lecteur, Paul me cite Jules Verne – la lecture de cet auteur fut aussi ma passion toute mon enfance durant – et deux auteurs contemporains de science-fiction, l'Anglais Peter F. Hamilton et le Français Alain Damasio. Cette prédilection est le signe d'une intense familiarité avec ce champ littéraire. Il affectionne aussi le théâtre. À cet égard, lors de sa scolarité à Palaiseau, il fut un fidèle du binet *théâtre d'improvisation*, lieu où se nouaient des amitiés avec d'autres amateurs de théâtre. Il fréquenta aussi le binet *œnologie* : il affectionne les vins tanniques autres que les bordeaux, tels que les cahors et les madirans. Nous avons évoqué ensemble un grand margaux, le Château-Lascombes (point de lien de parenté !).

Le succès d'Exotrail

La start-up qu'il cofonda se nomme Exotrail : « En 2015, j'ai commencé à travailler sur un projet étudiant visant à concevoir du matériel pour tester un dispositif de micropropulsion. Je ne savais pas à l'époque où cela me mènerait. Sept ans plus tard, l'entreprise née de ce projet précoce est Exotrail et, en plus de la propulsion, nous ouvrons la voie pour fournir des solutions de mobilité dans le secteur spatial. Je ne saurais être suffisamment reconnaissant envers David Henri, qui faisait partie de ma promotion à l'École polytechnique, pour le travail incroyable accompli depuis lors en tant que cofondateur d'Exotrail. Et je n'oublie pas Jean-Luc Maria et Nicolas Heitz. Mais aujourd'hui nous célébrons la jeunesse ! Avec David, nous avons été nommés dans la catégorie *30 Under 30* – Europe par Forbes ! Je ne dirai pas qu'il s'agit d'une réalisation personnelle, puisqu'elle provient du travail collectif réalisé chez Exotrail, mais je suis tout de même fier de faire partie de cette classe lors de ma vingt-neuvième année ! » Deux des quatre cofondateurs de la start-up venaient de la section volley ! À présent (été 2022), Exotrail grandit. Paul veille à sa croissance – 70 salariés à ce jour, 200 comme objectif 2023 – « mais en maintenant l'ADN et en conservant la prise d'autonomie des personnes ».

Pour conclure, une phrase de Paul Lascombes qui exprime bien son caractère : « Ce que j'aime, c'est construire des choses. »

SOMMAIRE DU DOSSIER

17 **La physique quantique doit devenir un sujet industriel**
par Alexandre Krajenbrink (X12) et Elvira Shishenina (X11)

18 **Des labos de l'X au *venture capital*, bâtissons une industrie quantique**
par Christophe Jurczak (X89)

23 **Les processus quantiques : la recherche fondamentale vers l'ingénierie**
par Loïc Henriet (X09)

26 **Des ingénieurs quantiques à l'X : un défi pluridisciplinaire**
par Landry Bretheau (X05) et Thomas Ayral (X07)

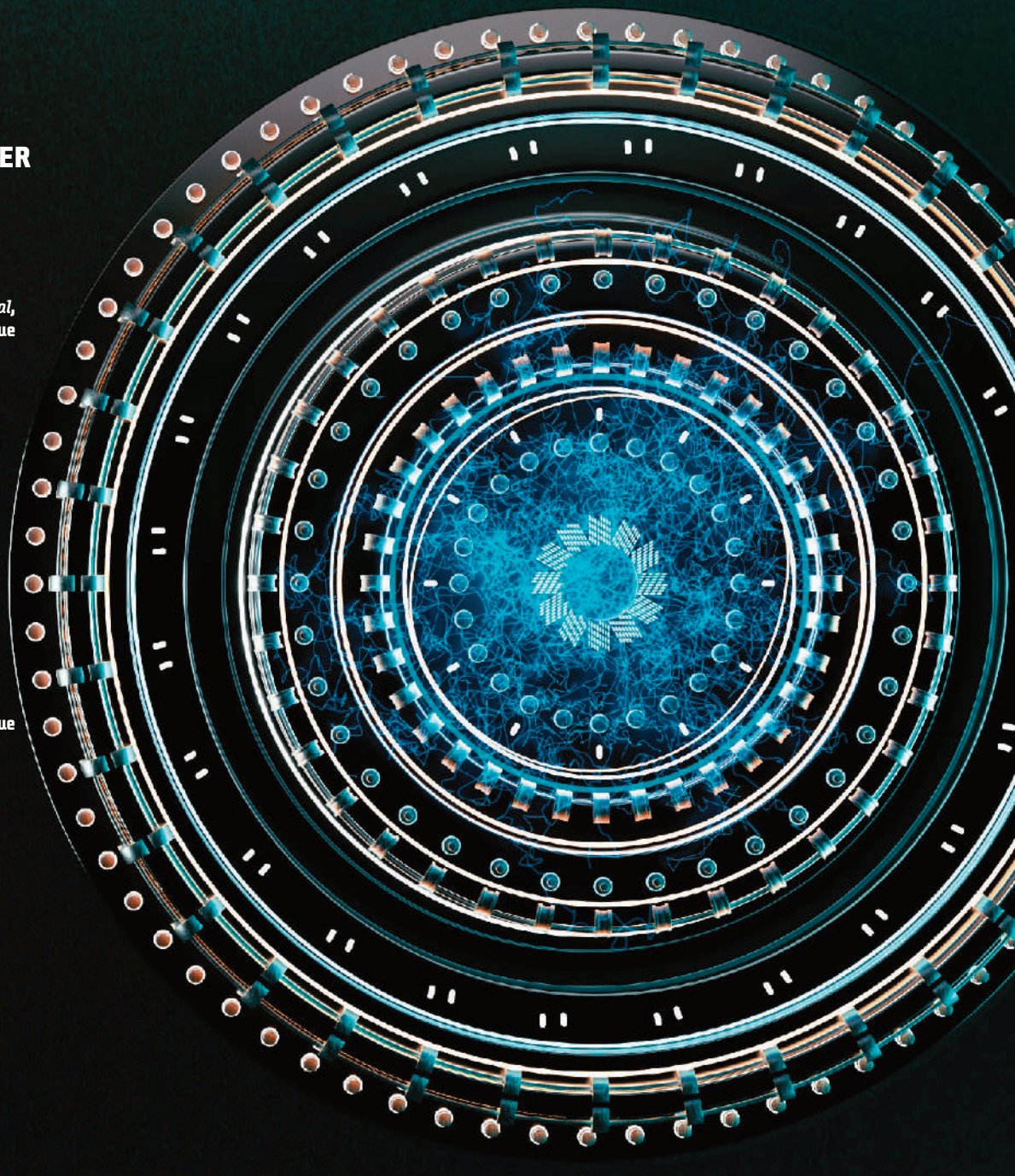
30 **Les initiatives françaises pour une diplomatie quantique**
par Alexandre Krajenbrink (X12) et Elvira Shishenina (X11)

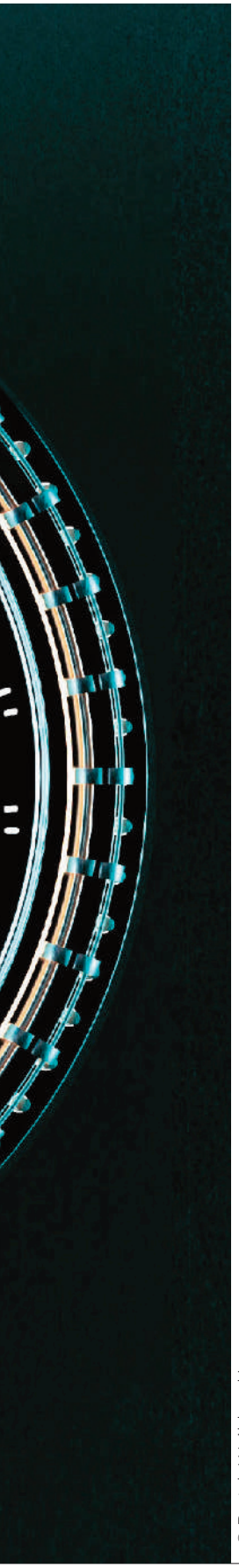
34 **La souveraineté nationale au sein du plan national quantique**
par Neil Abroug

36 **L'innovation quantique dans le contexte de la culture francophone**
par Vincent Aimez

40 **Le calcul optique : des prémices aux horizons quantiques**
par Tristan Gautié (X14)

43 **Étymologix, à propos du quantique**
par Pierre Avenas (X65)





© Bartek Wróblewski

LA PHYSIQUE QUANTIQUE DOIT DEVENIR UN SUJET INDUSTRIEL

ALEXANDRE KRAJENBRINK (X12)
Senior Research Scientist chez Quantinuum, secrétaire général de QuantX, VP Education du Lab Quantique

ELVIRA SHISHENINA (X11)
Quantum Computing lead chez BMW, présidente de QuantX, présidente du Lab Quantique

La physique quantique vit aujourd'hui une nouvelle révolution : celle de s'extraire de la recherche fondamentale et académique pour devenir un sujet industriel. Cette révolution repose sur le développement de multiples piliers : le matériel, les logiciels, les algorithmes, les cas d'usage et les écosystèmes.

De tels développements ont des implications que le présent dossier sur « l'industrie quantique » va tenter d'éclairer. Pensons à la plus grande porosité entre les entreprises quantiques et le monde académique – similaire à ce que nous avons pu constater avec l'intelligence artificielle. Mais aussi à la diplomatie quantique, qui permettra des collaborations bilatérales et de représenter le savoir-faire français, et à l'instauration de formations pour que les ingénieurs s'approprient les nouveaux outils quantiques et fournissent des cas d'usage, lesquels repousseront les limites des machines. Nous abordons aussi des questions émergentes dont la résolution dessinera les contours de l'industrie quantique : ce dossier n'est donc pas un cours de mécanique quantique, mais un corpus à destination d'ingénieurs voulant comprendre l'émergence d'une industrie dans le contexte actuel.

Les ingénieurs quantiques d'aujourd'hui sont des physiciens et mathématiciens reconvertis aux problèmes quantiques, mais ce ne sont pas des ingénieurs quantiques natifs ; il faut repenser la formation pour développer cette filière. Par ailleurs, la majorité des entreprises quantiques est issue de laboratoires académiques, il faut donc comprendre comment transitionner de la recherche fondamentale vers l'ingénierie quantique. Se posent ensuite des questions liées à la mise en place d'une doctrine nationale. Qui dit nouvelles technologies dit problématique de souveraineté nationale et de propriété intellectuelle : il faut se doter d'une stratégie permettant de répondre aux enjeux encore à définir.

Parmi les piliers susmentionnés, les écosystèmes sont fondamentaux car ils auront un impact sur les utilisateurs, qui bénéficieront de l'accélération quantique. Leur fondation est complexe mais possible à partir d'initiatives locales : les plus importantes étant dans la communauté polytechnicienne. Les entreprises quantiques sont influencées par les cultures scientifiques et d'innovation des pays où elles ont été fondées. Ces influences peuvent être une force pour rapprocher des écosystèmes étrangers et il convient de comprendre comment, notamment au sein de notre culture francophone. Une dernière question, d'ordre historique, est de cerner les promesses des technologies quantiques et de les mettre en correspondance avec des technologies passées qui n'ont pas su répondre aux attentes, pour ne pas répéter les erreurs du passé.

Nous dédions ce dossier à Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022, sans qui aucun des auteurs ne serait acteur de cette future industrie quantique.

DES LABOS DE L'X AU VENTURE CAPITAL, BÂTISSONS UNE INDUSTRIE QUANTIQUE

CHRISTOPHE JURCZAK (X89)
associé fondateur de Quantonation,
cofondateur de Pasqal,
trésorier de QuantX

L'auteur retrace son parcours fort peu linéaire, des bancs de l'X au financement en *venture capital*, dans l'émergence de l'industrie quantique et il en tire les leçons. Pour bâtir une industrie quantique, l'hybridation des technologies classique et quantique est aujourd'hui nécessaire. L'Europe doit opérer le financement en *venture capital* du changement d'échelle des entreprises arrivées à maturité. Enfin, c'est en ouvrant les applications quantiques à d'autres domaines de la physique que sera maintenu un dynamisme renouvelé pour le secteur.

C'est Jean-Louis Basdevant, professeur de physique à l'X de 1975 à 2005, qui m'a introduit à la physique quantique, comme un grand nombre des camarades de ma génération, et Alain Aspect qui m'a convaincu de faire ma thèse de docteur de l'X sous sa direction dans le secteur, sur la « spectroscopie par corrélations d'intensité d'atomes refroidis par laser », à l'Institut d'optique, soutenue en 1996. Jean Dalibard, maintenant professeur au Collège de France, a été mon directeur de DEA. Enfin un autre professeur du département de physique, le regretté Gilbert Grynberg, m'a offert la possibilité de réaliser un stage postdoctoral sur ce qu'on appelle aujourd'hui la « simulation quantique » dans son équipe au laboratoire Kastler Brossel du département de physique de l'ENS. Des géants… sur un sujet qui a mené au prix Nobel pour Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips et Steven Chu en 1997. Et vingt-six ans plus tard, bien évidemment au prix Nobel 2022 qui vient d'être décerné à Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger. Le prix est attribué pour leurs travaux fondamentaux sur l'intrication, auxquels je n'ai pas eu l'honneur de participer. Mais le comité Nobel note aussi : « Leurs résultats ont ouvert la voie à de nouvelles technologies basées sur l'information quantique », à très juste titre, car toute l'industrie du quantique et mon travail aujourd'hui reposent sur ces travaux majeurs très justement finalement récompensés.

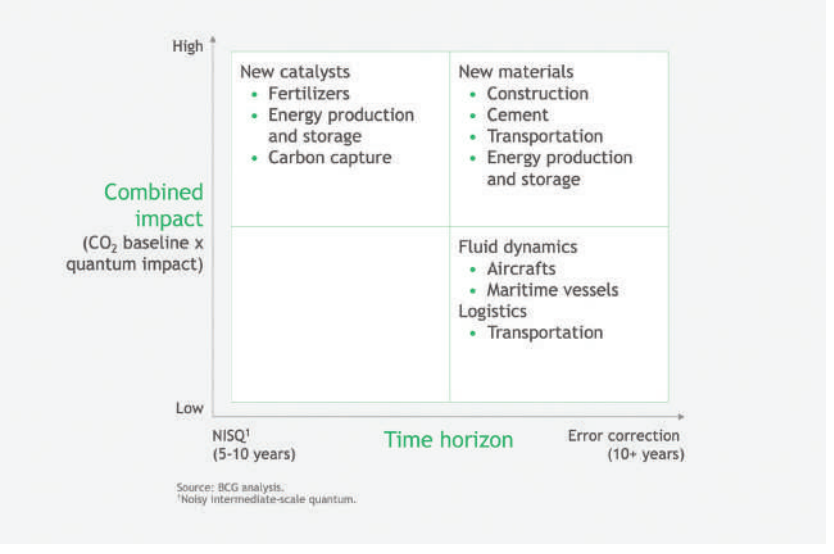
Au lendemain des expériences d'Alain Aspect

Mais à l'époque, à la fin des années 90, pour ceux qui – comme moi – n'avaient pas la vocation académique chevillée au corps, il n'y avait pas vraiment d'option pour trouver un emploi « dans le quantique ». L'option recherche du corps de l'armement – ma filière – orientait vers l'optronique, l'électronique, les matériaux, et il y avait l'équivalent dans les grandes entreprises de défense qui sont devenues Thales et Safran notamment. On pouvait aussi s'orienter vers le tissu des PME et ETI, traditionnellement fort en France en optique et lasers notamment. On était à une décennie à peine des fameuses expériences d'Aspect. Ces expériences, point de départ de la deuxième révolution quantique, démontrèrent que le concept d'intrication – jusqu'alors vu un peu comme un ovni théorique – était en fait consubstantiel de la description quantique de la réalité et qu'on pouvait imaginer en faire un usage pratique pour des applications futures. En 1992, Shor montrait que son algorithme de factorisation donnait lieu à un « gain exponentiel » si jamais on était capable de l'implémenter sur un « ordinateur quantique ». Ekert montrait dans ces années comment l'intrication et la non-localité pouvaient être utilisées pour distribuer des clés cryptographiques avec une sécurité parfaite.

La société d'investissement Quantonation Ventures

Mais tout cela était fort théorique et après ma thèse je connus un début de carrière très épanouissant à la DGA – en optronique puis dans la conception du futur système de force aéroterrestre sous la direction d'Yves Demay (X77), de Jean-Bernard Pene (X74) et de Vincent Imbert (X76) – avant de bifurquer vers les énergies renouvelables, dans le public puis le privé, en Europe et aux États-Unis. J'étais loin d'imaginer que trente ans plus tard je contribuerais à créer une toute nouvelle industrie qui, pour en revenir à mon histoire personnelle et à un point dont je suis très fier, donnerait la possibilité à des étudiants physiciens – docteurs, ingénieurs, voire *bachelors* – de trouver un emploi dans le secteur où ils ont choisi de faire leurs études. Avec la société d'investissement Quantonation Ventures que j'ai lancée à Paris avec mes partenaires Olivier Tonneau et Charles Beigbeder, nous avons à travers notre premier fonds Quantonation I doté de 91 M€ – soutenu notamment par BPIfrance, les industriels Thales, BASF et de nombreux *limited partners* privés internationaux – investi depuis 2018 dans 22 sociétés partout dans le monde. Cela fait de nous l'investisseur le plus actif dans le secteur quantique, pas seulement en France ou en Europe, mais au niveau mondial. Nous avons créé à travers ces jeunes pousses plus de 400 emplois, dont la moitié environ pour des physiciens à différents niveaux. Je pense parmi nos camarades à l'exemple de Loïc Henriet (X09), CTO de Pasqal, un des leaders mondiaux du calcul quantique, une société dont Alain Aspect est un des cofondateurs, avec notamment Antoine Browaeys qui est professeur chargé de cours à l'X ; Loïc a rejoint la société juste après son stage postdoctoral en Espagne. Je pense aussi à Théau Peronnin (X12) qui a fondé la start-up Alice&Bob dans la perspective de réaliser un ordinateur universel avec correction d'erreur. Mais il y a aussi, au-delà de ces start-up, des emplois dans des groupes comme Atos avec Cyril Allouche (X95) et d'autres, Microsoft avec Vivien Londe (X11) ou BMW où notre camarade Elvira Shishenina (X11) est responsable du quantique. Cette communauté active de polytechniciens se retrouve au sein du groupe QuantX.

"L'investisseur le plus actif dans le secteur quantique au niveau mondial."



Source : BCG.

↓ Un exemple d'analyse des applications du calcul quantique, en matière de mitigation des impacts du changement climatique. Le tableau montre les horizons d'application de l'ordinateur quantique pour des thématiques données en fonction des capacités de la technologie et de l'impact.

L'ordinateur quantique et les communications quantiques

Grâce aux efforts sans relâche des chercheurs académiques sur près de vingt-cinq ans – en France au CEA, au CNRS et à l'Inria notamment – nous sommes parvenus à comprendre et, en conséquence, contrôler des phénomènes physiques qui ont un impact sur le « monde réel », selon une expression du Prix Nobel Frank Wilczek dans un article visionnaire de 2016 qui a été une profonde source d'inspiration pour moi (« Physics in 100 years » *Physics Today*, 69, 4, 32) dans mon retour vers la physique quantique à travers l'investissement dans l'innovation. Et, après les premiers investissements privés à partir de 2015-2016, soit par des grands groupes notamment IBM et Google, soit par les start-up émergentes du quantique, concomitants avec des financements publics importants pour la recherche et l'innovation, on a commencé à imaginer et à implémenter des applications de ces technologies, notamment pour les ordinateurs quantiques. Certes, il existait des applications bien plus tôt – je pense aux horloges atomiques ou aux gravimètres développés par le pionnier français Muquans fondé par mon voisin de table optique Bruno Desruelle (lui aussi en thèse avec Alain Aspect !) – mais dans des niches relativement étroites. L'ordinateur quantique et les communications quantiques font entrevoir des marchés beaucoup plus massifs à moyen-long terme, et ce changement d'échelle est fondamental pour des investisseurs en *venture capital* tels que Quantonation.

Des phénomènes difficiles à maîtriser encore

L'analyse synthétisée sur la figure 1 ci-contre, présentée par notre camarade Jean-François Bobier (X96) lors d'un événement conjoint Quantonation – Boston Consulting Group à Boston il y a quelques mois, est une bonne illustration des progrès réalisés dans l'analyse de l'impact potentiel de ces technologies, qui pourrait être massif à terme. Il était impensable de produire une telle analyse il y deux ou trois ans, mais les progrès conjoints sur le *hardware* et les *softwares* applicatifs permettent de les envisager. C'est le dialogue serré entre toutes les parties, les fameuses « preuves de concept » réalisées à petite échelle, qui alimente ce type d'analyse. À défaut, on risque de tomber dans le *hype* qui peut être très dommageable pour toute l'industrie, en particulier quand il s'agit de climat, avec le reproche de *greenwashing* qui peut être mérité. Mon expérience est que ce sont ceux qui refusent le dialogue et portent des →

approches dogmatiques – qu'ils soient industriels, investisseurs ou chercheurs – qui sont le plus souvent victimes d'une vision décalée des réalités de la physique et des attentes des utilisateurs. Il ne faut jamais perdre de vue que tout ce secteur repose sur des phénomènes difficiles à maîtriser encore, nous sommes au début de l'aventure et la prospective est un art difficile, pour le quantique au même titre que pour les autres « technologies profondes ». Pensons aux prédictions sur la *blockchain* ou la voiture autonome.

L'informatique quantique et les applications financières réelles

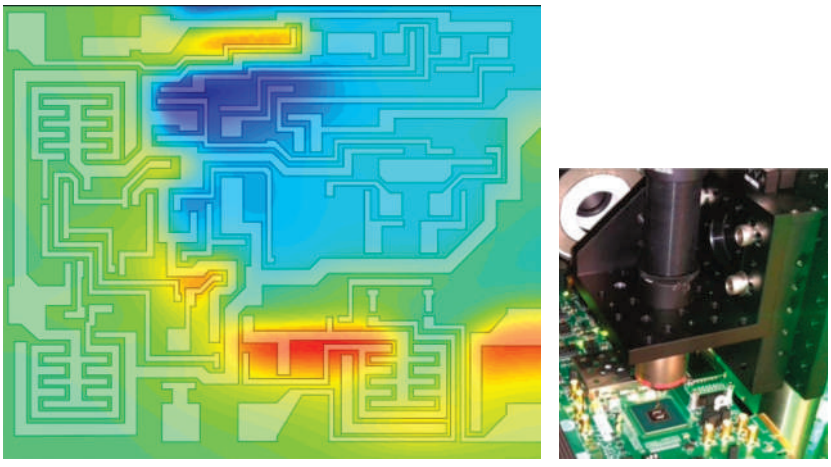
Les applications potentielles du calcul quantique sont variées, en finance notamment où des approches computationnelles très sophistiquées sont déjà appliquées par l'industrie. Une des entreprises qui s'est le plus impliquée dans l'analyse des usages potentiels de l'ordinateur quantique est Crédit Agricole Corporate and Investment Bank. CACIB s'est associé à deux leaders, Pasqal (*hardware*) et Multiverse Computing (*software*), pour utiliser l'informatique quantique dans des applications financières réelles sur les marchés de capitaux et la gestion des risques. Des preuves de concept de grande ampleur sont en cours, avant un éventuel passage en production.

L'hybridation des technologies classique et quantique

Une autre évolution récente qui me semble fondamentale, car porteuse de résultats à court terme, est la réalisation que l'hybridation des technologies – classique et quantique – est nécessaire. On ne vivra pas « le grand soir quantique », mais les technologies quantiques vont progressivement prendre une place dans l'arsenal des technologies au service de la satisfaction des besoins de nos sociétés. Un exemple illustré sur la figure 2 ci-dessus est l'application d'imagerie quantique de processeurs par la start-up américaine EuQlid, dans laquelle Quantonation a investi. Les applications sont multiples, je citerai la cybersécurité avec l'identification de chevaux de Troie *hardware*, que des acteurs malintentionnés auraient pu implanter lors de la fabrication, ou le contrôle de défauts de processeurs en usine. Il s'agit d'une technologie d'imagerie combinant un senseur quantique, reposant sur la sensibilité d'échantillons à température ambiante de diamant synthétique dans lesquels on implante des défauts qui jouent le rôle de spins uniques très sensibles aux champs magnétiques à l'échelle nanométrique, et une technique d'analyse du signal extrêmement sophistiquée reposant sur des réseaux de neurones « inspirés de la physique ». On combine du quantique et de l'apprentissage profond, une tendance de fond.

Un secteur en forte croissance

Afin d'illustrer la dynamique du secteur, la figure 3 (ci-contre) montre les montants investis par les fonds de *venture capital*



Source : EuQlid.

↑ Exemple de combinaison d'une technologie de *hardware* quantique (microscope magnétométrique à base de centres colorés dans le diamant) et d'une analyse de données sophistiquée de type PINN (*physics-informed neural network*).

À gauche : distribution de champ magnétique.

À droite : microscope à diamant quantique configuré pour la mesure de champ magnétique dans des circuits intégrés.

dans le secteur. La dynamique est spectaculaire, même s'il faut noter que les chiffres absolus sont bien faibles encore par rapport à d'autres secteurs. Les start-up de l'intelligence artificielle ont levé près de 110 G$ en 2021 ; on est donc loin de la « surchauffe » dont certains se gaussent, au contraire il faut plus de capitaux ! Malgré la crise, on s'attend à une année 2022 record. Et c'est sans compter les financements publics qui sont importants et croissent, car les gouvernements du monde entier sont mobilisés pour placer leur pays dans la course : les États-Unis, la Chine, mais bien sûr aussi la France, qui a son ambitieuse Stratégie nationale sur le quantique mise en place début 2021, et l'Union européenne et ses États membres.

Permettre le « scale-up » des pionniers

Une des explications principales pour la croissance du financement en *venture capital* est que le secteur est mature et que les entreprises arrivent au moment où elles ont besoin de financements à plus de 100 M$ par tour pour réaliser leur *scale-up* (changement d'échelle). La figure 4 (page suivante) le montre bien : la plupart des entreprises ont été créées dans les années 2017-2019 et arrivent donc en phase d'industrialisation. C'est pour cette raison que Quantonation Ventures a lancé en septembre 2022 son deuxième fonds, le Quantum Opportunity Fund, dédié justement au *scale-up* des start-up du calcul quantique. Ce fonds est focalisé sur l'Europe car c'est un fait avéré qu'il y a très peu de fonds européens capables de placer des tickets d'investissement dans des tours de financement de plus de 100 M€ dans ces phases critiques et, si l'Europe veut préserver une forme de souveraineté technologique, elle doit disposer de ce type d'instrument. Notre fonds a l'ambition de se positionner en investisseur de référence dans ces tours, compte tenu de la compétence que nous avons développée, en poussant les entreprises à formaliser des visions ambitieuses et à raisonner en termes d'impact, pas uniquement de développement technologique. Ma conviction est qu'il n'est pas trop tard pour l'Europe pour être dans la course, les sociétés ont été créés deux à trois ans après leurs concurrents nord-américains, mais le chemin est long et c'est maintenant avec ces tours de financement massifs que les jeux vont se nouer.

L'EXEMPLE DE LA START-UP QUBIT PHARMACEUTICALS

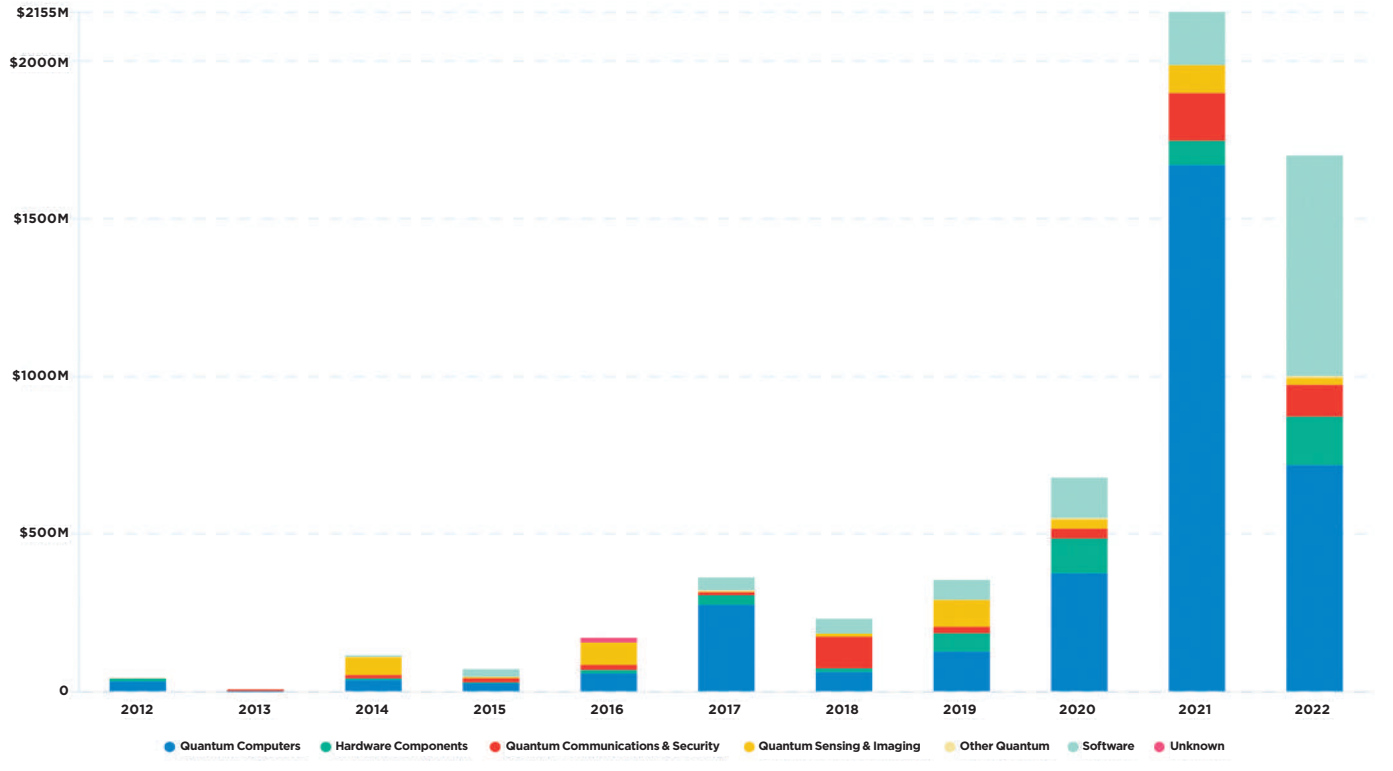
Un exemple qui m'est cher est celui de la start-up Qubit Pharmaceuticals dirigée par Robert Marino et Jean-Philip Piquemal, une des sociétés du portefeuille Quantonation dont je suis le plus fier et qui est certainement destinée à avoir un impact très important. Son objectif : révolutionner la recherche médicamenteuse par le calcul, rien que ça. Faisant fi de nombreux dogmes admis du *venture capital* quant aux caractéristiques des projets qui ont une chance de succès, nous avons soutenu l'équipe de cinq fondateurs français et américains, tous des pontes académiques dans leurs domaines respectifs, pour les accompagner au fil de quatre années afin de donner corps à leur idée, leur associer un CEO visionnaire capable de porter leur projet, travailler ensemble au modèle de business en le faisant évoluer. Le résultat est une levée de fonds record en amorçage, associant des investisseurs prestigieux, des publication scientifiques qui font référence dans le domaine de la recherche de médicaments contre la Covid et des perspectives de partenariat avec des biotech. La technologie de la société est implémentée sur des cartes graphiques GPU et progressivement le calcul quantique sera intégré à leur *process*, au fur et à mesure que les qubits seront disponibles, ceux de Pasqal, Quandela, IBM ou d'autres sociétés. C'est parce que les fondateurs et les équipes connaissent parfaitement la chimie quantique et les algorithmes classiques permettant de modéliser des molécules de très grande taille dès aujourd'hui qu'ils sont les mieux placés pour imaginer comment un ordinateur quantique va les aider, cela semble évident mais le fait est que nombre d'acteurs du calcul quantique se permettent de pontifier sur les applications en chimie sans avoir cette compétence, avec comme conséquence que leurs annonces tonitruantes ne sont absolument pas pertinentes.

Un essoufflement des créations d'entreprises ?

Un autre commentaire sur la figure 4 : je suis préoccupé par le fait que le rythme de création d'entreprises a diminué ces trois dernières années. Plusieurs explications à cela, j'en citerai deux. Nous avons clairement vu émerger une première génération de scientifiques-entrepreneurs de talent qui ont porté de beaux projets aujourd'hui en phase de croissance, mais le vivier de talents est limité, on ne peut pas encore bénéficier de l'expérience de fondateurs de nouveaux projets entrepreneuriaux qui seraient issus de la première génération de start-up du quantique (*serial entrepreneurs*) et, si l'on voit un flux de nouveaux projets de qualité d'origine académique en Amérique du Nord (Harvard, University of Chicago…), le renouvellement n'est pas aussi marqué en Europe.

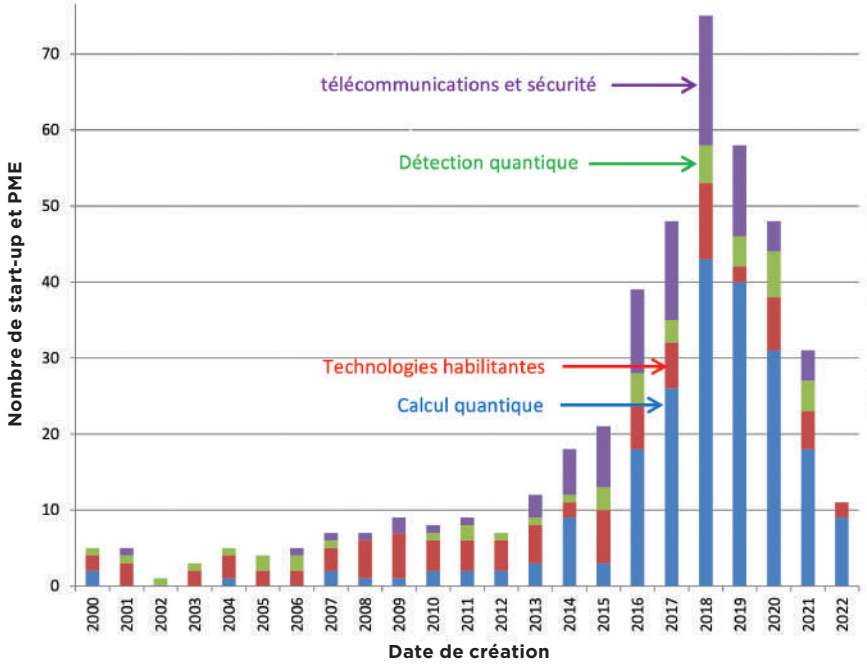
Une seconde explication à mon avis est que certains ont l'impression que les jeux sont faits et qu'il n'y a plus de place pour de nouvelles initiatives. C'est vrai dans une certaine mesure et, pour certaines technologies notamment pour le calcul quantique, on voit mal comment certains projets peuvent se faire une place quand la science issue des laboratoires associés n'apporte pas un avantage décisif par rapport à la concurrence qui a trois à cinq ans d'avance. Mais il faut faire preuve d'imagination, identifier les applications non encore servies par exemple, et faire →

↓ Investissements annuels en venture capital dans les start-up du quantique.



Source : The Quantum Insider (Octobre 2022)

Source : Olivier Ezratty, *Understanding Quantum Technologies 2022*



source : Olivier Ezratty compilation, August 2022

Country	Computing	Enabling	Sensing	Services	Comm - Sec	Total
USA	58	40	19	4	25	146
UK	20	11	8	5	18	62
France	10	27	10	4	5	56
Canada	31	6	4		11	52
Germany	16	19	4	1	6	46
India	11			3	4	18
Switzerland	3	8	1		4	16
Netherlands	7	4	1	1	2	15
China	6		1		6	13
Japan	10	2		1		13
Spain	7	3			1	11
Finland	4	3		2	2	11
Israel	4	2	2		3	11
Australia	6		3	1	1	11
Denmark	3	6			1	10
Singapore	5	1	1	1	1	9
Italy	2	3	1	1		7
Sweden	2	4				6
Russia		2			4	6
Poland	3				2	5
Austria	3				1	4
Turkey		1	1			2
Bulgaria	1				1	2
Tchekia				1	1	2
Estonia	2					2
UAE	2					2
Greece	2					2
Belgium		1				1
Bielorussia	1					1
South-Korea	1					1
Hong-Kong	1					1
Uruguay	1					1
Taiwan					1	1
Ukraine	1					1
Chile					1	1
Lybia	1					1
Luxembourg		1				1
Norway	1					1
Columbia	1					1
Total	226	144	56	25	101	552

↑ Rythme annuel de création de start-up dans le quantique et répartition par pays. La France se place bien dans la course mondiale, l'Union européenne fait jeu égal avec les États-Unis en termes de nombre de sociétés mais est en retrait en matière de financement puisqu'elle collecte 10,8 % du capital levé contre 70 % pour l'Amérique du Nord où les sociétés sont plus matures.

→ porter les efforts sur celles-ci, ce qui réclame une réflexion stratégique initiale plus forte et une vision à long terme bien étayée et ambitieuse. C'est pourquoi Quantonation soutient plusieurs initiatives destinées à faire émerger de nouveaux projets, ce qu'on appelle des *Venture Studios* avec des modalités variées, en France (*Quantum Launchpad* porté par Da Vinci Labs), au Québec (en lien avec la Zone d'innovation quantique de Sherbrooke) ou aux États-Unis (Californie et Maryland).

Voir plus large

Une autre façon de faire croître le pipeline de possibilités est de voir plus large. Ma motivation initiale à la création de Quantonation était le financement de l'innovation en physique, pas uniquement la physique de la seconde révolution quantique avec intrication et superposition en première place, mais aussi en ce que j'appelle la *deep physics*, la physique avec un pouvoir de disruption important. Un exemple est issu directement de l'article de Frank Wilczek cité plus haut, c'est la start-up Sensorium basée à Nashville aux États-Unis qui développe des matériaux nouveaux, des métamatériaux qui permettent d'optimiser l'interaction entre la lumière et la matière, aux fins de créer des dispositifs dans la bande de l'infrarouge lointain (8-12 µm). L'objectif ultime est d'ouvrir au plus grand nombre la capacité de voir dans cette bande, avec l'accès à de nouvelles données sur notre environnement. « En élargissant considérablement le sensorium humain, nous ouvrirons les portes de la perception et verrons le monde tel qu'il est réellement », dit Wilczek. Pas d'intrication en jeu mais « de la belle physique » avec des applications évidentes. J'ai en tête deux sociétés créées par des camarades qui sont passés par le MIT, Jérôme Michon (X11) fondateur de InSpek en France et Charles Roques-Carmes (X13) fondateur de Astrahl à Boston, tous deux en photonique avec des applications en chimie et en imagerie médicale, je pense qu'on entendra parler d'eux… Je veux croire que l'engouement pour les technologies quantiques va s'étendre rapidement à d'autres domaines de la physique, c'est comme cela aussi qu'on aura plus de beaux projets qui vont intégrer le portefeuille d'opportunités pour les investisseurs, et aussi plus d'emplois à la clé pour nos jeunes physiciens et polytechniciens.

"La France a son ambitieuse Stratégie nationale sur le quantique mise en place début 2021."

Les effets positifs de la crise

Beaucoup à faire et de très belles perspectives donc, de nature à encourager nos jeunes camarades à s'engager dans le secteur des technologies quantiques, dans la recherche publique, la création d'entreprises, l'industrie. Mais on peut légitimement se demander si l'industrie quantique à peine émergente, qui commence à trouver ses applications, ne serait pas destinée à être une des premières victimes de la crise économique. Paul-François Fournier (X89), directeur exécutif de la direction innovation de BPIfrance et grand supporter de l'industrie quantique et des *deep tech* en France, considérait dans une interview récente aux *Échos* que l'écosystème de l'innovation en France était suffisamment mûr et résilient face à la crise, et il ajoutait : « Rappelons aussi aux investisseurs que c'est historiquement dans les bas de cycle que se construisent les meilleurs rendements. » En plus d'une discipline renforcée dans la gestion des ressources des entreprises du secteur, la crise nous force à travailler sur les applications à court terme, sur l'impact de ces technologies pour la société maintenant et pas seulement dans une décennie. C'est un défi que l'industrie doit relever, je suis convaincu que c'est faisable, j'ai esquissé quelques pistes plus haut, travaillons-y ! ×

LES PROCESSUS QUANTIQUES : LA RECHERCHE FONDAMENTALE VERS L'INGÉNIERIE

LOÏC HENRIET (X09)
CTO de Pasqal

Alors que de nombreux processeurs fondés sur des technologies distinctes sont progressivement mis à la disposition des acteurs académiques et industriels, la construction d'un véritable écosystème du calcul quantique débute seulement. Une approche globale mêlant l'applicatif, le développement logiciel et le *hardware* quantique et classique est nécessaire pour utiliser ces ressources de façon optimale.

↑ Vue du processeur quantique industriel Fresnel, développé par Pasqal, monté sur une structure standard de rack pour calcul haute performance.

De nombreuses plateformes quantiques opèrent déjà dans des régimes qui sont hors de portée des supercalculateurs classiques. Citons par exemple les atomes neutres, qui ont démontré leur supériorité sur des problèmes de simulation quantique [Schreiber, Scholl], les qubits supraconducteurs et les circuits aléatoires désormais célèbres depuis les expériences de Google [Arute] ou les plateformes photoniques et le *boson sampling* [Zhong]. Ces expériences constituent des jalons fondamentaux dans la course à l'ordinateur quantique, mais elles concernent des problèmes académiques sans application industrielle directe. Pour rendre ces développements utiles, il faut transformer ces prototypes de recherche fondamentale en outils industriels. →

Penser le développement de l'industrie quantique

Ce changement d'utilisation requiert une plus grande fiabilité et une plus grande reproductibilité des calculs réalisés. Pour ce faire, il est nécessaire de transiger sur le degré d'ouverture de ces plateformes, au profit d'une plus grande robustesse ; et la modularité et la facilité de maintenance sont à privilégier. Cette approche diffère grandement du mode de fonctionnement académique, dans lequel les expériences sont traditionnellement construites pour être évolutives et pouvoir être transformées facilement, avec une conception mobile. Au-delà de l'industrialisation de la conception des processeurs et de l'amélioration nécessaire des métriques fondamentales qui déterminent leurs performances (fidélité des opérations quantiques, taux de répétition, nombre de qubits), il est nécessaire de penser le développement de l'industrie quantique émergente à un niveau global.

Des algorithmes hybrides impliquant des ressources classiques et quantiques

On compare souvent les débuts de l'informatique quantique aux débuts de l'informatique classique. Mais cette comparaison a des limites, dans la mesure où l'informatique quantique peut s'appuyer sur les infrastructures et les pratiques développées pour le calcul haute performance classique et le web. Le premier levier classique qui peut être mis à profit correspond au développement de l'accès *via* le *cloud* aux processeurs quantiques. Ce mode d'accès permet aux utilisateurs de comprendre plus précisément le *hardware* et aux développeurs de *hardware* de mieux comprendre les attentes des utilisateurs. En 2020, IBM déclarait déjà plus de 200 000 utilisateurs avec plus de 70 milliards de circuits utilisés *via* leur *cloud*, ayant généré plus de 200 articles scientifiques. Ce fonctionnement hybride facilite aussi une implémentation optimale des algorithmes variationnels, où le processeur quantique est utilisé pour créer un algorithme paramétrique optimisé par un processeur classique dans une boucle fermée.

Au-delà de ces algorithmes variationnels simples, pour lesquels le processeur classique se cantonne à un simple rôle d'optimiseur, on a pu récemment voir l'émergence de véritables algorithmes hybrides impliquant des procédures complexes du côté classique. On peut citer l'exemple récent des réseaux de neurones quantiques pour problèmes de graphe (*quantum graph neural networks*), qui intègrent au sein d'un réseau de neurones classique traditionnel un mécanisme d'agrégation de l'information calculé grâce un processeur quantique [Thabet]. Pour un tel algorithme, la collocation d'un processeur quantique avec des ressources de type GPU semble nécessaire pour limiter les coûts de transfert des données et atteindre des performances intéressantes. Ces développements s'inscrivent dans la vision de supercalculateurs hybrides, incorporant des éléments classiques et quantiques. Ce mode de fonctionnement est au cœur de l'initiative européenne HPCQS, dont l'objectif est de déployer une infrastructure hybride de calcul haute performance couplée à des processeurs quantiques. On retrouve aussi cette vision hybride très marquée dans la stratégie d'entreprises comme Nvidia ou IBM. En plus d'être une chance pour un développement plus rapide, adosser les technologies quantiques émergentes aux infrastructures classiques est en fait une nécessité : il ne suffit pas avec le calcul quantique d'apporter de meilleures performances algorithmiques, il faut aussi faciliter l'intégration d'une composante quantique aux outils déjà utilisés par les industriels.

"Des supercalculateurs hybrides, incorporant des éléments classiques et quantiques."

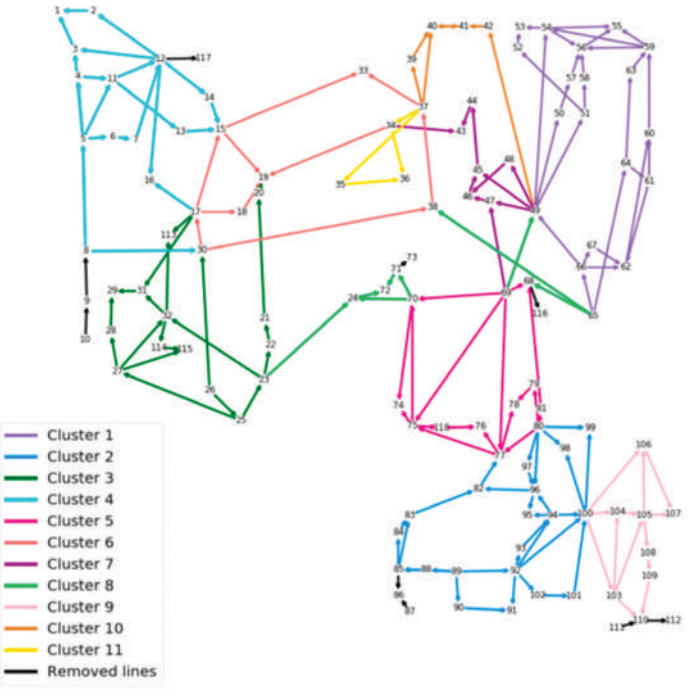
Un développement conjoint du logiciel et du hardware

L'informatique classique a vu le triomphe du développement logiciel indifférent au *hardware*. Cette philosophie est liée à la rapidité de développement des puissances de calcul pendant la phase 1980-2010. Les augmentations prévisibles de la capacité de calcul et de la mémoire ont rendu les innovations sur les architectures *hardware* très risquées. Même pour les calculs complexes exigeant des performances spécifiques, les avantages du passage à un *hardware* spécialisé pouvaient être rapidement éclipsés par la prochaine génération de *hardware* généraliste, dotée d'une capacité de calcul toujours plus grande. C'est ce qui a poussé la communauté vers des processeurs classiques les plus universels possible et le logiciel à se désolidariser progressivement du *hardware*.

Ce n'est plus le cas aujourd'hui, et il y a de plus en plus d'intérêt (par exemple en *machine learning*) à un développement joint entre le *hardware* et le *software*. Cela constitue une occasion unique pour le calcul quantique. Dans la période actuelle, où les processeurs quantiques sont bruités et imparfaits, il est tout à fait fondamental de procéder au développement algorithmique en ayant pleinement conscience des forces

APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE QUANTIQUE POUR LA GESTION DU RÉSEAU HAUTE-TENSION

Exemple d'algorithme issu d'une approche de conception mêlant les considérations hardware et applicatives, l'automatisation de la gestion du réseau haute tension est devenue une priorité pour les gestionnaires de réseau de transport d'électricité. La complexité du réseau (énergies intermittentes, flux transfrontaliers) associée à de multiples interdépendances rend la tâche difficile. Une approche prometteuse est d'avoir des automates locaux, qui sont chacun en charge de l'équilibre pour un sous-ensemble du réseau (voir figure ci-contre). Cependant, la détermination de ces sous-ensembles relativement indépendants est une tâche difficile. L'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique sur graphes développés par Pasqal pourrait améliorer considérablement la qualité de la segmentation. Ces algorithmes ont été développés spécifiquement pour des processeurs quantiques à atomes neutres dont la géométrie du registre est reconfigurable, permettant ainsi un traitement naturel de données structurées sous la forme de graphes.



Source : présentation publique RTE.

de chaque processeur, tout en essayant de limiter les impacts de ses limitations intrinsèques. C'est cet argument qui a en partie motivé de nombreux acteurs du domaine comme IBM ou Google d'opter pour une approche dite *full-stack*, combinant le *hardware* et le développement logiciel. Le secteur a aussi assisté à plusieurs consolidations vers le *full-stack* avec les fusions d'Honeywell et de CQC, de Pasqal et de Qu&Co, ou de ColdQuanta et Super.tech. Ces rapprochements facilitent le développement d'algorithmes natifs, qui engendrent peu ou pas de surcoût à l'implémentation, qui devient alors plus directe et robuste.

Avoir des points de comparaison pertinents

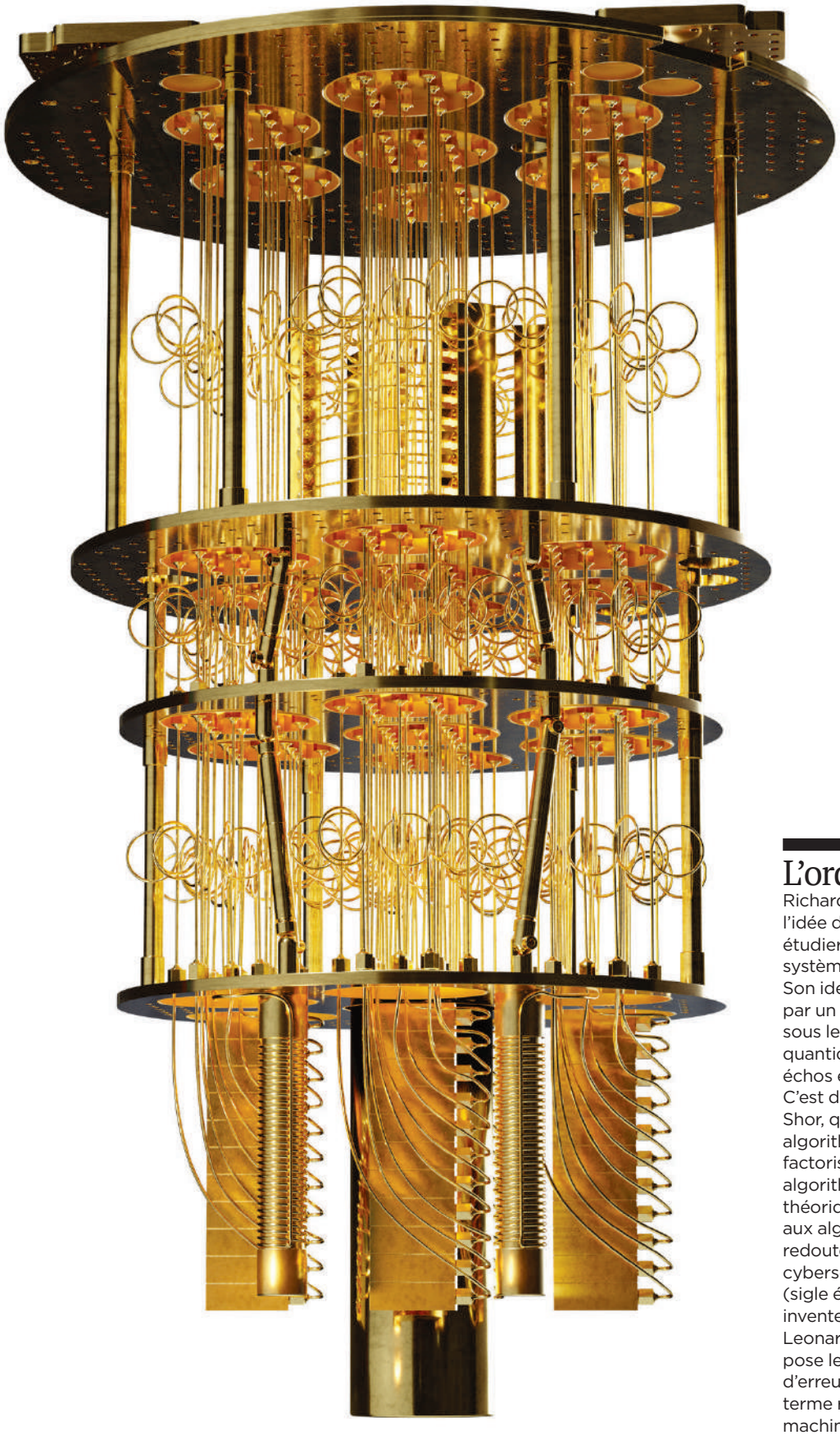
La cohabitation d'équipes d'algorithmiciens et de constructeurs de *hardware* a un autre avantage considérable en termes applicatifs. Les équipes théoriques peuvent travailler directement avec des clients sur des cas d'usage réels et confronter leurs algorithmes quantiques à l'état de l'art classique. En pratique, peu d'industriels se soucient des performances asymptotiques d'un algorithme en production, tant que celui-ci fournit les meilleurs résultats possibles sur leurs problèmes concrets. En se confrontant aux meilleurs algorithmes classiques en production, les acteurs du quantiques peuvent alors avoir des points de comparaison solides et pertinents. Mieux encore, les équipes applicatives peuvent aider à la conception des futures générations de *hardware*, en s'appuyant sur des retours d'expérience concrets.

Au-delà de l'utilisation d'algorithmes sur les plateformes bruitées actuelles, la notion de développement conjoint entre le *hardware* et le *software* peut s'appliquer à long terme pour l'élaboration d'architectures avec codes de correction d'erreur. L'implémentation de procédures tout à fait générales risque sans doute d'induire des surcoûts prohibitifs pour le succès de la correction d'erreur. Il paraît de plus en plus nécessaire de travailler sur des procédures spécifiques, qui permettent de tirer parti des spécificités de chaque processeur. Des analyses fines des canaux d'erreur, des différents temps caractéristiques mis en jeu pour les mesures et les opérations logiques sont nécessaires pour calibrer le compromis entre l'application d'opérations logiques et les phases de correction active ou de mitigation d'erreur.

↑ Exemple de segmentation d'un graphe, réalisée pour déterminer des zones relativement indépendantes à placer sous le contrôle d'automates locaux.

Références :

[Arute] Arute, et al., *Nature* 574, 505 (2019)
[Scholl] Scholl, et al., *Nature* 595, 233 (2021)
[Schreiber] Schreiber, et al., *Science* 349, 842 (2015)
[Thabet] Thabet, et al., *ICLR submission* (2022)
[Zhong] Zhong, et al., *Science* 370, 6523, (2020)



© DP

L'ordinateur quantique

Richard Feynman a suggéré en 1982 l'idée d'un « ordinateur quantique » pour étudier et prédire le comportement des systèmes régis par des lois quantiques. Son idée est formalisée trois ans plus tard par un autre physicien, David Deutsch, sous le nom de machine de Turing quantique. Le concept trouve vite des échos en mathématiques, par exemple. C'est d'ailleurs un mathématicien, Peter Shor, qui invente l'un des premiers algorithmes quantiques, permettant la factorisation en nombres premiers. Cet algorithme permet une accélération théoriquement exponentielle par rapport aux algorithmes classiques, faisant redouter des failles pour les systèmes de cybersécurité utilisant le cryptage RSA (sigle établi à partir des noms de ses trois inventeurs Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman). C'est aussi Shor qui pose les bases des codes correcteurs d'erreur, dont on pense qu'ils pourront à terme réaliser le plein potentiel des machines quantiques.

DES INGÉNIEURS QUANTIQUES À L'X : UN DÉFI PLURIDISCIPLINAIRE

LANDRY BRETHEAU (X05)
professeur à l'École polytechnique, chercheur en physique quantique au sein du Laboratoire de physique de la matière condensée (PMC)

THOMAS AYRAL (X07)
ingénieur-chercheur quantique (Atos Quantum Laboratory) & chargé de cours à temps partiel au département de physique de l'École polytechnique

La seconde révolution quantique, avec l'ordinateur quantique, permet d'envisager des usages nouveaux et prometteurs de ces nouvelles technologies. Mais, pour inventer les nouvelles techniques et imaginer les nouveaux usages, il faut des ingénieurs dotés de qualités originales. L'X est à cet égard bien placée pour jouer un rôle central dans la réponse à ce défi.

Quand on pense à la mécanique quantique, on songe souvent au chat de Schrödinger – à la fois mort et vivant. Mais aujourd'hui c'est à un autre « en même temps » qu'est confronté le domaine des technologies quantiques. Car depuis quelques années la physique quantique, grâce à l'avènement des premiers processeurs quantiques, a dépassé le domaine purement fondamental et académique. Elle intéresse désormais des domaines aussi divers que la chimie, la science des matériaux, l'informatique théorique et appliquée, les mathématiques – fondamentales et appliquées, l'optimisation, le calcul haute performance, la biologie, mais aussi le monde plus large de l'innovation. « L'ingénieur quantique » de demain devra donc savoir faire ce grand écart disciplinaire.

Un grand écart disciplinaire

Cette pluridisciplinarité est loin d'être nouvelle. La « première révolution quantique », qui utilise les effets statistiques de la mécanique quantique, a permis la création du transistor, du laser, de l'horloge atomique – utilisés dans des applications aussi variées que les ordinateurs classiques, les télécommunications, le système GPS ou Galileo. Quant à la « deuxième révolution quantique », celle qui utilise l'intrication entre les états quantiques individuels, elle est en gestation depuis les années quatre-vingt. Avec des démonstrations expérimentales – l'expérience d'Alain Aspect à l'Institut d'optique, par exemple – mais aussi avec des propositions théoriques, comme celle de Richard Feynman qui a suggéré en 1982 l'idée d'un « ordinateur quantique ». C'est la construction de prototypes expérimentaux d'ordinateur quantique qui attire aujourd'hui les autres disciplines vers l'informatique quantique. Dès la fin des années 90, de premiers qubits sont construits, avec des résultats précurseurs au CEA Saclay dans le groupe de Daniel Esteve et Michel Devoret. Environ vingt ans plus tard, en 2019, Google annonce à grand bruit avoir →

→ atteint la suprématie quantique avec un processeur composé de 53 qubits supraconducteurs. Google aurait ainsi exécuté, en 200 secondes, une tâche algorithmique qu'il aurait fallu 10 000 ans au meilleur ordinateur classique pour résoudre. Parallèlement, le géant du calcul haute performance IBM propose depuis 2016 des processeurs quantiques en libre-service sur le *cloud*.

La difficile quête d'une première application utile

Ces progrès expérimentaux ont lancé la quête de la première application utile de l'informatique quantique – celle qu'on appelle outre-Atlantique la *killer app*. Chaque domaine y va de son algorithme : la chimie quantique pour le calcul de taux de réaction, la science des matériaux pour la prédiction des transitions de phase, l'optimisation pour la résolution de problèmes combinatoires, la mécanique des fluides pour la résolution d'équations différentielles, la finance pour la prédiction de processus stochastiques, etc. Pour chacun de ces domaines, la traduction des équations à résoudre en programme quantique est loin d'être évidente : les règles de programmation à suivre sont bien différentes des règles des ordinateurs classiques, et ce pour des raisons fondamentales de physique. Il est par exemple impossible de copier des données, en raison du fameux théorème de non-clonage quantique. Il faut aussi affronter les subtilités liées aux propriétés de la mesure quantique, qui modifie l'état du qubit au moment où elle le mesure. Enfin, à cette difficulté intrinsèque vient s'ajouter le fait qu'il faut savoir mélanger (ou hybrider) des codes de calcul classique existants à des programmes quantiques. On utiliserait ainsi l'ordinateur quantique comme un coprocesseur (un *Quantum Processing Unit* – QPU – en somme), de la même façon que les cartes graphiques (GPU) sont aujourd'hui au cœur des progrès de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage machine.

Des obstacles physiques

À toutes ces difficultés s'ajoute la réalité physique des processeurs quantiques. Si le modèle mathématique d'un processeur quantique prédit des accélérations algorithmiques (pourvu qu'on sache le programmer), la réalité physique se révèle plus ardue. Bien qu'ils soient censés être à la fois dans l'état 0 *et* dans l'état 1 (*i.e.* dans un état de superposition quantique), les qubits ont tendance, sous l'influence du monde extérieur, à repasser, après des temps relativement courts, à l'état 0 *ou* 1 – tout comme, en réalité, le chat de Schrödinger souvent cité. Ainsi, après quelques centaines d'opérations, l'ordinateur quantique redevient classique, perdant son avantage. Ces erreurs, dites de « décohérence », sont en constante diminution au cours des dernières années grâce aux progrès du *hardware*… Néanmoins, elles ne permettent pas encore de résoudre des problèmes utiles plus vite ou mieux que nos ordinateurs classiques actuels : les calculs réalisés en chimie, par exemple, se limitent à de petites molécules, les plus grosses molécules entraînant des erreurs qui ne permettent pas d'atteindre la précision nécessaire au calcul de taux de réaction. Les solutions à ces problèmes de décohérence sont multiples et multidisciplinaires : solutions, comme évoqué, au niveau du *hardware*, avec l'amélioration continue des machines ou la conception de nouveaux types de qubits ; solutions au niveau du *software*, avec l'invention d'algorithmes résistant au bruit, ou bien de techniques dites de mitigation d'erreur.

Un écosystème complexe

Cette quête semée d'embûches est poursuivie, au-delà du monde académique, par de grands groupes industriels (Google, IBM, Intel, Amazon aux États-Unis, Alibaba en Chine, mais aussi Atos en Europe) aussi bien que par des start-up – le plus souvent issues du monde académique. Pour ne citer que quelques jeunes pousses françaises spécialisées dans le *hardware* quantique : Pasqal et ses atomes de Rydberg, Quandela et ses processeurs photoniques, Alice&Bob et ses « qubits de chat », C12 et ses processeurs sur nanotubes de carbone. Tous ces acteurs – chercheurs, industriels, start-up – redoublent d'efforts pour communiquer, de façon plus ou moins étayée, sur les vertus de leur technologie. Les enjeux sont de taille, avec des « plans quantiques » nationaux (États-Unis, Chine, France, Allemagne…) et supra-nationaux (Union européenne) et des financements privés (investisseurs) substantiels. Il est ainsi difficile de faire la part entre la vraie avancée scientifique et technologique et l'annonce publicitaire. Par exemple, l'annonce par Google de la suprématie quantique a été remise en question par de nombreuses publications depuis 2019 – chaque contre-exemple nécessitant un effort de recherche conséquent.

Le besoin d'ingénieurs quantiques

Cet écosystème quantique a donc un besoin croissant d'ingénieurs quantiques bien formés : d'ingénieurs et

d'ingénieurs-chercheurs qui puissent se saisir des différents enjeux – scientifiques, technologiques, voire politiques – pour décider des pistes prometteuses. Or une telle denrée est rare sur le marché du travail. Non pas parce que les différentes disciplines ne sont pas enseignées, mais parce que peu de programmes universitaires proposent de les mélanger avec une exigence forte dans chacune des sous-disciplines. Non seulement faut-il être formé aux fondamentaux de la mécanique quantique, mais il faut aussi comprendre les subtilités de la programmation quantique et son hybridation avec le calcul classique – ce qui nécessite une bonne connaissance de l'informatique classique. En plus de cela, la compréhension des domaines d'application – chimie, physique, mathématiques, optimisation… – est cruciale pour juger de la pertinence de tel ou tel algorithme quantique. Comme évoqué plus haut, difficile de déchiffrer une publication scientifique ou une annonce sans en connaître en détail le domaine, ou même refaire un calcul ! Car, pour juger de la pertinence d'un algorithme, il faut non seulement le comprendre mais aussi pouvoir le comparer aux solutions algorithmiques classiques existantes. Enfin, et surtout, des ingénieurs sont nécessaires pour mettre au point de nouveaux algorithmes qui puissent dépasser les performances des algorithmes classiques – que ce soit du point de vue de la vitesse ou du point de vue des performances énergétiques.

Une offre de formation en expansion

L'offre de formations quantiques est encore balbutiante, mais en pleine expansion. L'École polytechnique fait bien sûr référence en matière d'enseignement de la mécanique quantique, et ce depuis des décennies, avec notamment un cours de tronc commun marqué par des professeurs de renom comme Jean-Louis Basdevant, Jean Dalibard, Philippe Grangier ou Manuel Joffre. Mais c'est plutôt au niveau master que l'offre en « ingénierie quantique » se développe, avec la création de nombreux programmes de niveaux master et doctorat dans les quelques dernières années. Pour ne citer que quelques programmes franciliens : un master de *Quantum Engineering* à l'université Paris Sciences & Lettres, un master de *Quantum Technologies* à l'université Paris-Cité, le programme ARTeQ (année de recherche en technologies quantiques) coporté par l'ENS Paris-Saclay et l'Institut Polytechnique de Paris (IPP).

> *"La demande en ingénieurs quantiques généralistes va croître."*

La place de l'X dans cette offre

À l'IPP, par ailleurs, un parcours « sciences et technologies quantiques » a été mis en place en troisième année du cycle polytechnicien, complétant la formation à la physique quantique prodiguée en première et en deuxième année, ainsi que les cours dispensés dans les autres matières : mathématiques, mathématiques appliquées, informatique, biologie. Dans ce parcours Sciences et Technologies Quantiques, proposé par le département de physique de l'École polytechnique, la formation sur les technologies quantiques associe cours théoriques sur les technologies quantiques actuelles et le formalisme permettant de les modéliser, et étude critique de publications scientifiques sur le sujet. L'accent y est entre autres mis sur la pratique concrète de l'informatique quantique, avec des travaux pratiques de programmation quantique sur *notebooks* Jupyter. D'autres départements de l'École polytechnique contribuent à cette formation, avec des modules de cours dispensés par le département de mathématiques appliquées (contrôle quantique) et d'informatique. Enfin, un PhD Track *Quantum Science & Technologies* permet aux étudiants de poursuivre leur formation par un doctorat – une formation par la recherche essentielle dans un domaine où l'innovation provient en grande partie de la recherche, y compris dans les grandes entreprises telles que Google ou IBM, qui restent très proches des milieux académiques.

Cette offre, que ce soit à l'IPP ou dans d'autres cursus, est appelée à s'étoffer et à gagner en multidisciplinarité. Avec la multiplication des moyens de calcul quantiques et des défis algorithmiques pour les faire fonctionner de façon fiable et viable, la demande en ingénieurs quantiques généralistes, formés à tous ces sous-domaines, va croître.

LES INITIATIVES FRANÇAISES POUR UNE DIPLOMATIE QUANTIQUE

ALEXANDRE KRAJENBRINK (X12)
Senior Research Scientist chez Quantinuum, secrétaire général de QuantX, VP Education du Lab Quantique

ELVIRA SHISHENINA (X11)
Quantum Computing lead chez BMW, présidente de QuantX, présidente du Lab Quantique

Deux initiatives françaises de premier plan existent dans le domaine quantique : QuantX – une association des anciens de l'École polytechnique – et Le Lab Quantique – une association loi de 1901 siégeant au sein du Plan national quantique. Elles ont créé la plus grande compétition d'informatique quantique au monde : le BIG Quantum Hackathon.

Un des piliers d'une industrie forte est l'écosystème qui la sous-tend. Former cet écosystème est une question compliquée, car il doit être assez flexible pour s'adapter aux besoins fluctuants de la recherche académique, du développement de l'ingénierie, du talent estudiantin et des contraintes des agences étatiques. Sur une thématique aussi émergente que le quantique, un des objectifs d'un tel écosystème est de permettre une vraie porosité de dialogue entre les décideurs, les chercheurs, les entrepreneurs et les financiers, afin de soutenir le développement de la technologie quantique. Un écosystème peut prendre plusieurs formes et est en général composé de plusieurs organes ; cela peut être un groupe d'anciens d'université, une association loi de 1901 ou une fondation, un consortium industriel ou bien une agence parapublique. Une fois constitué, il se doit d'être vivant, d'avoir un lieu incarné pour mener ses activités d'animation et de s'ouvrir le plus possible aux écosystèmes d'autres industries ou d'autres pays.

Les deux principales structures françaises d'animation

Nous avons la chance au sein de la communauté polytechnicienne de compter sur une très grande diversité de profils et de talents dans l'industrie quantique. Début 2020, avec notre camarade Christophe Jurczak (X89), nous avons eu l'idée de fonder QuantX dans le but de fédérer notre communauté autour de toutes les technologies quantiques, que ce soient les calculs, les capteurs ou les communications. Les membres fondateurs de QuantX sont des chercheurs, des fondateurs de start-up, des financiers, des chefs d'entreprise convaincus que l'X n'est pas simplement une école de premier rang, mais aussi un des plus importants réseaux dans le monde académique et industriel. Fort de ce constat, l'ambition de QuantX est de contribuer au progrès technologique, d'encourager le transfert de connaissances, de participer à la découverte de nouvelles applications des technologies quantiques et de développer l'enseignement des futures générations d'ingénieurs quantiques. Cette ambition repose sur notre vision que le succès de l'industrie quantique tiendra de l'excellence scientifique et du soutien à l'entrepreneuriat et aux initiatives transverses. Notre première collaboration s'est matérialisée avec Le Lab Quantique qui est devenu un partenaire de confiance pour compléter les actions d'animation de QuantX afin de créer un réseau quantique mondial. Fondée par Christophe Jurczak, Jean-Gabriel Boinot (Quantonation) et Jean-Christophe Gougeon (BPIfrance), l'association encourage les initiatives ascendantes dans l'écosystème quantique mondial et représente les intérêts de l'écosystème quantique français au sein du Plan national quantique, et il définit l'effort de diplomatie de la scène quantique française.

Les initiatives d'animation conjointes

Covid-19 oblige, nous avons commencé par animer la communauté des enthousiastes du quantique en 2020 par une série de webinaires. Le plus abouti, *Quantum Computing hardware en France : les start-up en vue*, a réuni les représentants des cinq start-up majeures travaillant sur le développement de qubits physiques provenant de différents systèmes : la photonique (Quandela), les atomes neutres (Pasqal), les qubits de chat supraconducteurs (Alice&Bob), les centres NV dans les diamants (DiamFab) et les nanotubes de carbone (C12). Cette diversité a permis de montrer l'engagement solide des jeunes talents et une grande ambition de la France de devenir un leader de la course mondiale →

LE PREMIER BIG QUANTUM HACKATHON

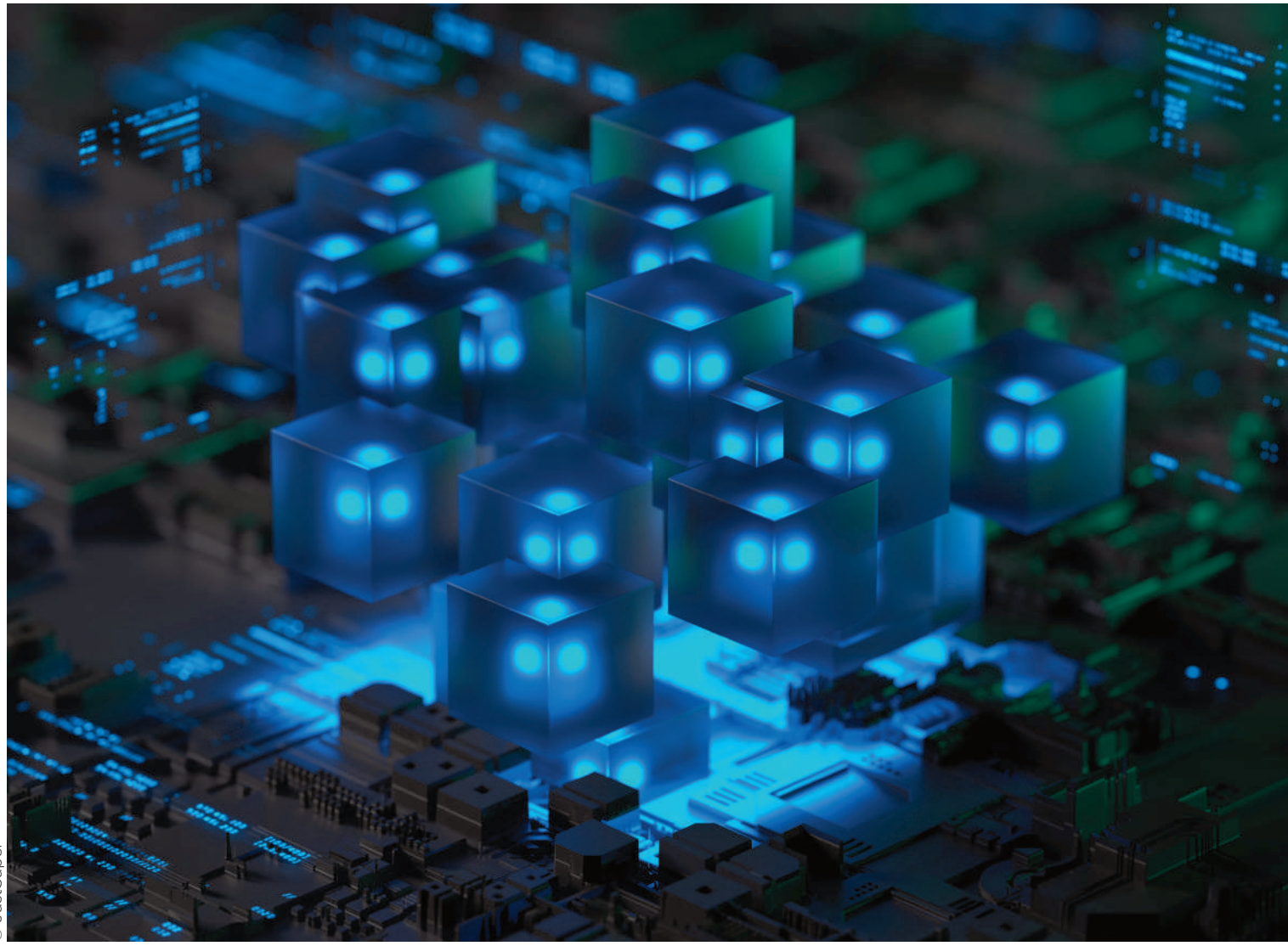
Le premier BIG Quantum Hackathon à Paris a été organisé en 2021 sous le haut patronage de Cédric O – ancien secrétaire d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, et Neil Abroug – coordonnateur national pour la Stratégie quantique. L'événement a été soutenu par BPIfrance, l'Inria, GENCI, Quantonation et Le Lab Quantique. Il est devenu la plus grande compétition d'informatique quantique, en raison du nombre d'acteurs de l'écosystème international de l'informatique quantique impliqués, et l'une des plus originales en raison de sa structure en deux phases : technique et business.

Au cours de la phase technique, les équipes d'étudiants en master, doctorat et ingénieurs de recherche ont eu à résoudre des cas d'usage fournis par dix entreprises industrielles et financières (Airbus, BMW Group, CA-CIB, EDF, ENI, L'Oréal, Roche, Saint-Gobain, Société Générale, Thales) sur les plateformes fournies par neuf fournisseurs de logiciels et matériels dans le quantique (Pasqal, AWS, Quantinuum, Microsoft, IBM, Google, Xanadu, QC Ware, Atos). Les meilleures solutions techniques ont été sélectionnées pour la phase business du concours par un jury d'experts. Dans la phase suivante, les équipes d'investisseurs *venture capital / private equity* (BPIfrance Large Venture, Elaia), de cabinets de conseil (Capgemini), d'étudiants en MBA (Insead) et *Executive* MBA (École polytechnique) ont dû s'approprier et challenger les meilleures solutions techniques dans le contexte des problématiques business des entreprises industrielles, en fournissant la stratégie d'intégration de ces solutions aux propriétaires des cas d'usage, mais aussi l'estimation des ressources et une feuille de route pour un avantage computationnel futur.

La cérémonie de remise des prix et le cocktail de réseautage en présence du ministre Cédric O pour célébrer le succès du BIG Quantum Hackathon ont réuni plus de 150 participants, dont un quart de cadres dirigeants du CAC 40. L'événement a renforcé les liens créés pendant le hackathon et a fourni la plateforme pour de nouvelles collaborations et initiatives. Nous avons par ailleurs été invités chez QuantX à présenter la méthodologie de nos hackathons, devant plusieurs ministres lors du lancement de la plateforme européenne hybride HPC-QC. Le succès du BIG Quantum Hackathon à Paris a été reconnu par les écosystèmes étrangers, montrant l'engagement de la communauté quantique pour des actions conjointes.

La série de BIG Quantum Hackathons a été lancée au Canada en collaboration avec Québec Quantique, au Royaume-Uni avec National Quantum Computing Centre, à Grenoble avec Minalogic, CEA, GENCI et Atos. En 2023 les événements sont prévus à Chicago avec le Chicago Quantum Exchange, à Singapour avec le Centre for Quantum Technologies, et le tout premier BIG HPC-AI-QC Hackathon avec EuroHPC pour démontrer le potentiel du calcul hybride. Pour assurer la continuité entre les hackathons et impliquer davantage de partenaires, nous avons annoncé une plateforme numérique QuantX applications. La plateforme collectionnera des cas d'usage industriels et offrira la possibilité de proposer des solutions et de construire des benchmarks en temps réel, d'entrer en contact avec les propriétaires des cas d'usage, de solliciter le soutien d'experts, d'échanger des idées et des solutions techniques. À l'avenir, la plateforme hébergera également un forum pour les offres d'emploi.

→ à l'informatique quantique. Un autre webinaire sur *Les Réseaux quantiques* organisé avec l'association Aristote a dévoilé un autre aspect de la technologie quantique, démontrant l'avenir de l'internet quantique et de la communication quantique sécurisée. Le webinaire a réuni plus de mille participants du monde entier autour des *keynotes* et des tables rondes avec des experts en France (Quantonation, BCG, Institut de physique de Nice), en Allemagne (MPI of Quantum Optics), au Royaume-Uni (Kets Quantum Security, VeriQloud, University of Edinburgh), à Singapour (SpeQtral) et aux États-Unis (Qunnect). Par nos efforts d'évangélisation de la technologie quantique, notamment par le partage des points de vue d'experts, de nombreuses collaborations sont nées (entre industriels et fournisseurs quantiques, entre fournisseurs quantiques et fournisseurs quantiques, et entre universités et fournisseurs quantiques) au sein du réseau polytechnicien de QuantX et au-delà. En effet, pour poursuivre nos actions et multiplier les efforts et canaux de communication, nous avons collaboré avec des initiatives et associations déjà existantes autour des technologies quantiques.



© JustSuper

Un nouveau modèle de hackathon

Deux ans et demi après la création de QuantX et après une dizaine d'événements, nous avons convergé vers un concept unique au sein de l'écosystème quantique mondial. Ce concept, intitulé le BIG Quantum Hackathon, est un concours unique qui vise à rassembler toute la chaîne de valeur de l'informatique quantique, pour révéler sa capacité à relever les défis de la vie réelle. Cet événement réunit des entreprises industrielles et financières, des investisseurs en capital-risque et des consultants-experts, qui s'associent à des spécialistes et étudiants en informatique quantique issus du monde universitaire, à des fournisseurs de matériel et de logiciels quantiques, pour répondre à un ensemble de problèmes issus de domaines aussi différents que la chimie, l'apprentissage automatique, l'optimisation, la finance ou la simulation numérique. Fondamentalement conçu et orienté vers la *résolution collaborative de cas d'usage industriels*, le BIG Quantum Hackathon aide les participants à mesurer l'impact réel de leur travail, à tester la performance des solutions de calcul quantique actuellement disponibles, à sonder l'intérêt commercial existant pour de telles solutions, ainsi qu'à mieux cerner les priorités et les efforts à fournir dans les années à venir.

De l'animation nationale à la diplomatie quantique

La dynamique d'un écosystème le conduit nécessairement à s'ouvrir vers des écosystèmes étrangers. Utilisée à bon escient, la relation entre deux écosystèmes permet de développer un canal informel pour mener des actions de diplomatie scientifique ou industrielle. C'est le point de vue que nous adoptons au sein de QuantX et du Lab Quantique et qui nous a conduits à développer des partenariats avec notamment Chicago Quantum Exchange (USA), Québec Quantique (Canada), National Quantum Computing Center (UK), Centre for Quantum Technologies (Singapore) et PushQuantum (Allemagne). Nous avons eu la chance à travers ces collaborations d'accueillir des délégations étrangères à Paris, comme la ministre déléguée à l'Économie du Québec, de présenter les pépites de notre industrie quantique et d'amorcer des discussions permettant l'expansion d'entreprises françaises à l'étranger ou réciproquement. Un exemple concret de cela est la participation de l'entreprise Pasqal à un BIG Quantum Hackathon à Montréal en juin 2022, en amont de l'ouverture de leur bureau nord-américain.

"Tisser le lien entre le monde académique et le monde industriel."

La Maison du Quantique

Un des chantiers actuels de QuantX et du Lab Quantique est de créer des lieux en France entièrement dédiés au quantique – les Maisons du Quantique – qui visent à devenir le poumon de l'animation de l'écosystème quantique. La première de ces Maisons se matérialisera par un immeuble dans Paris, ayant la capacité d'héberger des entreprises du quantique françaises et étrangères et un incubateur ou amorceur de start-up quantiques – le *Quantum Launchpad* mentionné dans son article par Christophe Jurczak. Elle permettra d'organiser des activités telles que des hackathons, des *meetups*, des accueils de délégations étrangères, ou encore des conférences. La Maison du Quantique aura aussi des espaces de loisirs tels qu'une librairie scientifique, un espace d'exposition d'art inspiré des sciences physiques et quantiques et un FabLab permettant des expérimentations. À l'instar d'instituts scientifiques renommés à travers le monde comme l'Institut Henri-Poincaré à Paris, l'Institut du Flatiron à New York ou encore le Mila à Montréal, la Maison du Quantique veut être un lieu emblématique du quantique avec un fort rayonnement à l'international. Nous sommes aujourd'hui heureux de pouvoir compter sur des partenaires de qualité comme Quantonation, GENCI, Zaz Ventures et des membres du corps académique pour faire naître ce projet ambitieux.

Quelles sont les perspectives et les ombres au tableau ?

QuantX et Le Lab Quantique sont encore des structures de taille modeste, mais nos projets sont multiples : nous aimerions par exemple lever des fonds privés pour financer des thèses de doctorat en France, afin que le monde académique qui a tant donné aux entreprises quantiques puisse se voir à son tour soutenu par celles-ci. Plus généralement, nous souhaitons être le maillon de référence pour tisser le lien entre le monde académique et le monde industriel. Finalement, afin de mener nos actions jour après jour, un problème critique est le financement pérenne de nos structures associatives, permettant d'avoir des collaborateurs à temps plein et de ne pas compter uniquement sur le temps libre de bénévoles. Les écosystèmes étrangers ont jusqu'à maintenant été abondés en financements publics, mais ce n'est pas encore le cas en France, mettant possiblement en péril l'efficacité et l'impact de l'écosystème français sur le plan mondial et le reléguant au rang de parent pauvre parmi ses pairs.

LA SOUVERAINETÉ NATIONALE AU SEIN DU PLAN NATIONAL QUANTIQUE

NEIL ABROUG
coordonnateur national de la Stratégie quantique – Secrétariat général pour l'investissement

Le Plan national quantique français vise à placer notre pays en tête de la compétition internationale dans l'utilisation des technologies quantiques. Il en va de notre indépendance nationale.

Si les premières applications de la physique quantique, à l'image des transistors, des lasers, des cellules photovoltaïques et des LED, ont profité de la maîtrise du contrôle des flux de quanta, une nouvelle classe de technologies quantiques, reposant sur la capacité à isoler les objets quantiques pour les manipuler individuellement, est en train d'émerger aujourd'hui. L'exploitation, dans ce contexte, des propriétés étonnantes de superposition et d'intrication ouvre la voie à des ruptures technologiques majeures dans le domaine du calcul, de la métrologie, de la communication et de la cybersécurité, impactant fortement un large champ de secteurs économiques, ainsi que la sécurité nationale.

Un espoir de ruptures majeures

À long terme, la perspective de réaliser l'ordinateur quantique universel passant à l'échelle porte un espoir de ruptures majeures, dans des secteurs stratégiques à l'image de la santé, la lutte contre le réchauffement climatique, l'alimentation, la pharmaceutique, l'énergie et la cybersécurité. Cette ambition représente un pari que la France est l'un des rares pays en mesure de relever. Les enjeux de souveraineté liés au développement des technologies quantiques sont élevés. Sans accélération immédiate, la France ne serait pas assurée d'un libre accès à ces technologies dans le contexte géostratégique d'aujourd'hui, d'autant plus que le marché sera étroit et pointu, du moins dans un premier temps.

Le choix français d'un environnement ouvert

Depuis quelques années, des écosystèmes très fortement intégrés se constituent autour de machines qui, bien qu'elles ne confèrent pas d'avantage quantique avéré, permettent d'anticiper les ruptures futures tout en fédérant et fidélisant un écosystème de développeurs autour d'outils de développements *hardware*-dépendants. Aujourd'hui, ces stratégies constituent un frein à l'adoption du calcul quantique par les secteurs aval qui appréhendent, au regard des différentes solutions technologiques en compétition, le risque d'une dépendance prématurée à une solution qui soit abandonnée à terme au profit des autres. Elles représentent plus largement un risque sur l'indépendance technologique nationale. Cet enjeu s'accompagne, également, d'une opportunité de développer un modèle ouvert, interopérable et *hardware*-agnostique. C'est ce choix qu'a fait la France à travers l'initiative HQI (Hybrid

HPC Quantum Initiative). Pilotée par le CEA, l'initiative HQI mobilise particulièrement GENCI (Grand Équipement national de calcul intensif) en charge du volet relatif aux acquisitions de simulateurs et calculateurs quantiques. Ce volet devrait être abondé au cours des prochaines années par des cofinancements européens et industriels. À plus long terme, la France vise à développer des ordinateurs quantiques tolérants aux défauts, capables de passer à l'échelle et de rendre possibles des calculs et modélisations de plusieurs ordres de grandeur plus complexes que ce qui est envisageable à court terme avec les supercalculateurs traditionnels.

Anticiper les risques de déchiffrement

S'il est peu probable à court terme, l'avènement post-2030 de l'ordinateur quantique capable de déchiffrer, éventuellement rétroactivement, des données protégées par des algorithmes à clé publique actuels n'est pas exclu. Pour faire face à ce risque, les agences de sécurité comme l'ANSSI recommandent de garantir la confidentialité et l'intégrité des systèmes d'information et des communications de l'État de manière anticipée, en développant et en déployant des schémas cryptographiques asymétriques, appartenant à la « cryptographie postquantique », résistant à une cryptanalyse quantique (e.g. CRYSTALS-Kyber et CRYSTALS-Dilithium récemment retenus comme prochains standards de cryptographie par le National Institute of Standards and Technology américain), d'une part, et en déployant, lorsque c'est pertinent, des schémas de cryptographie symétrique classique avec des tailles de clés adaptées, sur lesquelles un ordinateur quantique n'a pas d'impact connu (clés AES *Advanced Encryption Standard* en augmentant la taille de la clé de chiffrement), d'autre part.

Des technologies habilitantes au quantique

Quelle que soit l'issue de la course au développement de l'ordinateur quantique, l'ensemble des compétiteurs auront besoin d'accéder à des technologies classiques dites capacitances (cryogénie, lasers, isotopes stables, machines de dépôt sous vide, amplificateurs, filtres…). Ces technologies capacitances, si elles ne sont pas maîtrisées en France et en Europe, pourraient freiner nos développements, voire les bloquer. Elles pourraient *a contrario* apporter un impact économique à court terme pour l'ensemble de la stratégie quantique. C'est pour cela que, de manière assez singulière en comparaison avec les autres États, la stratégie quantique française accorde une attention particulière à développer les filières industrielles des technologies habilitantes au quantique, à travers plusieurs programmes structurants visant à consolider les chaînes de valeurs industrielles, notamment dans le domaine de la cryogénie, des lasers, de l'électronique bas bruit et des lasers.

Une attention particulière est également accordée dans la stratégie quantique française à la standardisation, aussi bien *de jure* (normalisation) que *de facto* (consortia privés et stratégies de constitution d'écosystèmes). La standardisation permet, en effet, par l'homogénéisation des spécifications des produits et services, l'accès à l'ensemble des marchés mondiaux et leur offre un moyen d'accroître fortement l'impact économique d'une innovation ou d'un titre de propriété industrielle, lorsqu'elles savent se positionner dans l'élaboration des normes. Le Laboratoire national de métrologie et d'essais s'est ainsi vu confier par l'État la mission d'animer les travaux de standardisation relatifs aux technologies quantiques.

"Un pari que la France est l'un des rares pays en mesure de relever."

Les objectifs clés de la Stratégie quantique française :

- Maîtriser les technologies quantiques offrant un avantage stratégique décisif, dont les accélérateurs, simulateurs et ordinateurs quantiques, les logiciels métiers pour le calcul quantique, les capteurs, les systèmes de communication.
- Dans le domaine du calcul, le thème central de la stratégie :
  - devenir le premier État à disposer d'un prototype complet d'ordinateur quantique généraliste de première génération dès 2023 ;
  - être un leader mondial dans la course à l'ordinateur quantique universel passant à l'échelle, en anticipant dès aujourd'hui les risques inhérents liés au faible niveau de maturité et à la complexité des technologies en cours d'exploration.
- Maîtriser les filières industrielles critiques dans le domaine des technologies quantiques, incluant les technologies habilitantes.
- S'affirmer comme l'un des leaders mondiaux en matière de cryogénie ou de lasers pour les technologies quantiques.
- Être la première nation à disposer d'une filière complète productrice de Si 28 industriel, notamment pour les besoins de la production de qubits.
- Développer les compétences et le capital humain, renforcer les infrastructures technologiques, créer un environnement favorable à l'intensification de l'entrepreneuriat, au transfert de technologie, et promouvoir l'attractivité vis-à-vis des acteurs internationaux et des meilleurs talents mondiaux.

L'INNOVATION QUANTIQUE DANS LE CONTEXTE DE LA CULTURE FRANCOPHONE

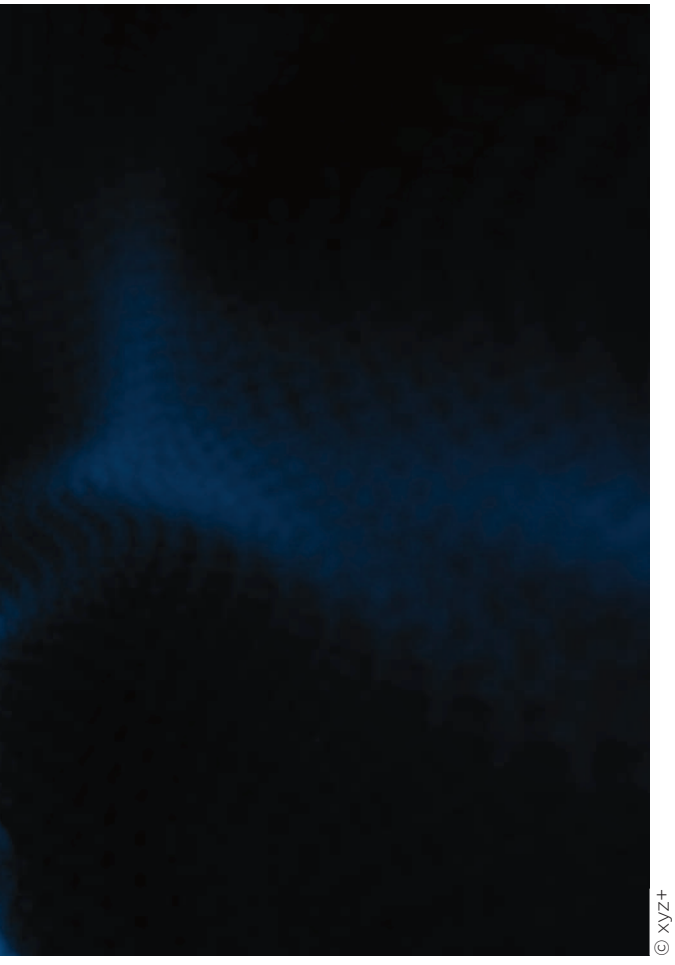
VINCENT AIMEZ
professeur à l'université de Sherbrooke et vice-recteur pour la valorisation et les partenariats

En conjuguant habilement les spécificités d'écosystème et de culture dans le monde francophone, il est possible de contribuer avantageusement au futur de l'industrie quantique, tout en réaffirmant et en ancrant dans la durée des modèles collaboratifs unis par la culture francophone.

Le domaine des sciences quantiques et de ses applications technologiques est en pleine effervescence. En effet, ce secteur traditionnellement développé dans les laboratoires de recherche se trouve mis sur le devant de la scène depuis quelques années, avec une croissance majeure des investissements à l'échelle mondiale. Bien que les perspectives liées à ce domaine soient majeures, les démonstrations actuelles se situent principalement à l'échelle des laboratoires et ne sont pas encore industrialisées. Cependant le domaine des capteurs quantiques est propice quant à lui à des applications concrètes dans un avenir proche. Cette situation particulière, dans laquelle un domaine de recherche fondamentale doit rapidement évoluer vers des produits et applications alors que les utilisateurs finaux ne connaissent pas la technologie en question mais sont toujours intéressés par une bien meilleure performance ou un coût de revient réduit, est particulièrement propice à l'entrepreneuriat et à la création de nouvelles start-up qui vont « connecter » les deux mondes.

Une compétition mondiale

Dans ce contexte de croissance majeure, on voit dès à présent des problèmes de pénurie de personnes expertes



© xyz+

dans les différents domaines associés. La compétition mondiale s'illustre autant sur le plan financier que sur le plan de l'attraction et de la formation de personnes hautement qualifiées qui répondront aux besoins variés de cette industrie. À l'échelle mondiale, on peut distinguer plusieurs stratégies de développement associées à des investissements majeurs. Un rapport récent du Boston Consulting Group estime ces investissements à une valeur de 450 à 850 G$ au cours des 15-30 prochaines années et on doit s'attendre à ce que les différents écosystèmes mondiaux se retrouvent d'une manière ou d'une autre en compétition active. En Europe par exemple, le volume d'investissements est conséquent mais la coordination intégrée entre les différents membres n'est pas encore établie. Les USA et la Chine sont dans le peloton de tête au niveau des investissements et on doit se poser la question de l'approche à suivre pour rester dans cette course à l'innovation.

Similitudes entre la France et le Québec

La France tout comme le Canada et le Québec en particulier ont mis en place des stratégies nationales quantiques. Le Québec de ce point de vue est intéressant car, de par sa taille modeste (8,5 millions d'habitants), il est clair que le succès de la province dans le domaine des sciences quantiques et des applications technologiques devra passer par des approches innovantes pour ne pas être « noyé dans la masse ». D'un certain point de vue, la France pourrait se retrouver dans une situation comparable à l'échelle mondiale. On l'aura compris, la différence et le succès des stratégies à développer au cours des prochaines décennies ne pourront pas être gagnants en se fondant uniquement sur les volumes d'investissements financiers dans un contexte mondial aussi compétitif. Une approche pour répondre à ces questions repose sur l'analyse des écosystèmes au sein desquels évoluent notamment la France et le Québec, soit l'Europe et la proximité avec l'Afrique d'une part et l'Amérique du Nord d'autre part ; mais aussi sur un élément essentiel qui peut faire la différence, la « culture francophone » – à ne pas confondre avec la francophonie.

Le système français

Par exemple, en France le système de la recherche notamment avec le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) repose sur un ensemble majoritaire de laboratoires mixtes, avec des universités partenaires sur le territoire national où travaillent un ensemble de personnes talentueuses majoritairement francophones mais où aussi de nombreuses personnes ne parlant pas français de manière régulière. La structure administrative globale de ces écosystèmes est certes complexe et associée à un lot de contraintes que l'on aimerait pouvoir réduire, mais de nombreux avantages associés à cette structuration ont permis de créer des « places fortes » de la science dans un ensemble de domaines de pointe. Soulignons à cet effet l'annonce du prix Nobel de physique 2022 à trois chercheurs dont Alain Aspect, directeur de recherche émérite du CNRS, professeur à l'Institut d'optique Graduate School - Université Paris-Saclay, professeur affilié avec distinctions à l'ENS Paris-Saclay et professeur associé à l'École polytechnique, travaillant au Laboratoire Charles Fabry (Institut d'optique Graduate School-CNRS, Université Paris-Saclay), pour ses travaux sur l'intrication quantique. En effet, par les différents processus de concours nationaux privilégiant l'excellence mais aussi par l'ouverture à toutes les personnes talentueuses quelle que soit leur origine ou leur culture, la France a su →

développer une force en recherche sur un large ensemble de domaines scientifiques, de niveau mondial. Les différents laboratoires sont pilotés par des équipes de direction en collaboration étroite avec les autorités universitaires et le CNRS en visant le renforcement des domaines d'expertise, ce qui se traduit après plusieurs décennies par une connaissance profonde et partagée entre les différents membres des laboratoires sur différents sujets de pointe. Les financements octroyés sont très rarement ciblés directement vers des chercheurs individuels et sont par conséquent liés directement à la stratégie scientifique du laboratoire. Cela maximise les interactions entre collègues et la mutualisation de ressources matérielles et humaines. En ce qui concerne l'entrepreneuriat, des structures comme CNRS Innovation permettent, grâce au programme d'accompagnement RISE, de faire émerger des start-up notamment dans le domaine quantique. Le premier fonds d'investissement dédié entièrement au domaine quantique Quantonation est né en France sous l'impulsion d'un groupe d'experts reconnus du monde scientifique et financier, une initiative avant-gardiste qui mérite d'être soulignée surtout dans ce contexte mondial ultra-compétitif.

Le système québécois

En Amérique du Nord, le financement est très ciblé sur les chercheurs individuels, ce qui crée des environnements très compétitifs et pas forcément inscrits sur de longues périodes. Cela se traduit par une grande agilité, mais aussi par des compétitions intenses à l'intérieur même des universités. Le Québec se situe à l'interface des systèmes français et nord-américain. Les programmes de financement ciblent les chercheurs individuellement sans pilotage par un laboratoire en particulier. Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) au niveau fédéral a même un programme de subvention à la découverte individuelle, pour des subventions d'une durée de cinq ans renouvelables *a priori* tout au long de la carrière des chercheurs, à condition de remporter un concours. Fait marquant, une fois les fonds octroyés, les chercheurs ont la possibilité de faire évoluer leur projet de recherche au-delà du projet présenté, à condition de convaincre le jury d'évaluation tous les cinq ans que leur stratégie scientifique a été un succès. Cette liberté académique est particulièrement appréciée et permet aux chercheurs concernés de piloter librement leur carrière scientifique. De plus, les fonds de recherche du Québec jouent un rôle rassembleur sur différentes thématiques fortes dans la province par la création de « regroupements stratégiques » où les chercheurs provenant des différentes universités collaborent et partagent leurs infrastructures. Cependant le financement des universités et les stratégies institutionnelles sont nettement plus autonomes par rapport au système français et cela mène à la création de différents écosystèmes propres à l'ADN des différentes institutions.

Des labos du CNRS dans les universités québécoises

Dans le domaine de l'entrepreneuriat, l'université de Sherbrooke (UdeS), située à 150 km à l'est de Montréal, à proximité des États ruraux du nord des États-Unis, a lancé il y a une dizaine d'années une stratégie entrepreneuriale dans les domaines des *deep tech*. Centré sur les étudiants, plutôt que sur les professeurs-chercheurs, ce modèle a été repris avec succès à Montréal et à Québec. Ce modèle s'est développé en mettant en place également des fonds d'investissement pour appuyer les jeunes pousses dans les premières étapes de leur croissance, sans avoir à les exposer trop tôt sur les marchés. La situation particulière de l'UdeS explique en partie cette stratégie car, en tant que 4e université au Québec après l'université de Montréal, l'université McGill et l'université Laval, l'UdeS était la seule en dehors des grands centres urbains et elle a dû se distinguer par son approche pédagogique. Elle se distingue également par sa stratégie de concentration des investissements dans des laboratoires partagés entre les différents chercheurs et en collaboration avec l'industrie. Cette stratégie a notamment permis à l'UdeS de mettre sur place une chaîne d'innovation intégrée (CII) allant des sciences quantiques à la microélectronique et couvrant des applications de l'échelle du laboratoire jusqu'à des lignes de production industrielle cogérées avec l'industrie. Cette CII a bénéficié de plus de 1 G$ d'investissements au cours des dix dernières années, dont 60 % en provenance du secteur privé. Cette approche hybride favorisant les regroupements de chercheurs en interne fait de l'UdeS un modèle particulièrement compatible avec le système français. Cela s'illustre par la présence à l'UdeS depuis dix ans du Laboratoire CNRS international en nanotechnologies et nanosystèmes (International Research Laboratory, IRL-LN2) et du nouveau Laboratoire CNRS international frontières quantiques (IRL-FRQ) inauguré en 2022. Trois autres laboratoires CNRS de ce type sont également présents au Québec (université Laval, université de Montréal et université MacGill-École de technologie supérieure ou ÉTS), ce qui représente la plus forte concentration de laboratoires CNRS internationaux au niveau mondial.

Une culture commune

On notera comme illustration d'une culture commune les motivations des étudiants entrepreneurs à la tête des différentes start-up en hautes technologies. La vaste majorité des équipes entrepreneuriales déclarent prioriser l'impact de leurs produits par rapport au succès commercial pur. Une sorte d'attachement à « réussir pour la société » dans leur domaine d'expertise, avant de « réussir en société »… De ce point de vue, la culture francophone est à nouveau un élément distinctif par rapport aux modèles à succès issus du monde anglo-saxon, qui privilégient les succès financiers et le réinvestissement dans différentes aventures entrepreneuriales pas forcément interconnectées entre elles.

Mutualiser les moyens et associer le privé

Face à ce constat quelles peuvent être les stratégies concrètes en lien avec la « gestion de l'innovation quantique » ? Bien que les sommes investies dans les autres écosystèmes soient très importantes, en France et au Québec l'accès au financement pour les jeunes entreprises aux premières étapes de leur développement est de bonne qualité et cela permet de stimuler le passage du laboratoire aux premières étapes d'un produit. Cependant, dans le domaine des *deep tech*, les investissements en capital requis par les entreprises pour passer du laboratoire au monde privé sont majeurs et cette étape constitue souvent un point de rupture pour les entrepreneurs, qui doivent alors accepter une majorité de fonds étrangers et souvent quitter leur écosystème pour continuer à se développer. En privilégiant le recours aux différentes plateformes technologiques établies pour ces entreprises, on peut repousser les besoins en investissement en capital propre tout en maximisant les taux d'utilisation de ces plateformes et leur financement par des frais d'accès. En collaboration avec les gouvernements, il est aussi possible de cibler des investissements dans des « masses critiques » d'équipements scientifiques gérés non seulement *via* des plateformes universitaires, mais aussi par des organismes à but non lucratif cogérés par des acteurs du monde académique et du monde privé. Ainsi en février 2022, le gouvernement du Québec annonçait la création de la zone d'innovation quantique à Sherbrooke avec un investissement initial des partenaires dépassant 400 M$. Cette approche associant l'écosystème académique à la sphère privée est particulièrement critique pour favoriser l'attraction de personnel hautement qualifié au sein des laboratoires de recherche tout en démystifiant le passage entre le secteur public et le secteur privé au sein de l'écosystème. Dans le domaine quantique en particulier, la pénurie de personnes expertes à tous les niveaux d'études est un problème fondamental et la gestion de ces ressources sera un facteur de succès aussi critique que celui des disponibilités de capitaux.

> *« Réussir pour la société avant de réussir en société. »*

Des studios quantiques

Avec une telle approche compatible avec les écosystèmes français et québécois, on peut stimuler les technologies quantiques, que ce soit sur le plan du *hardware* ou sur celui du *software*, pour enrichir les écosystèmes et les rendre encore plus attrayants et difficiles à quitter. Cette approche consiste à créer des « studios quantiques » construits sur les forces des écosystèmes régionaux bénéficiant de cette culture collaborative et de l'accès à ces ressources partagées. Ainsi configurés, les studios pourront solliciter directement les différentes équipes académiques pour lancer des travaux de recherche ciblés correspondant à des besoins industriels dans le secteur quantique. Cette approche permet de cibler dès le début les innovations liées aux besoins de marché, tout en augmentant le nombre de start-up qui seront naturellement ancrées dans ces écosystèmes. Sur la base de cette analyse, au-delà du lancement de plusieurs *Quantum Studios* qui seraient idéalement interconnectés, notamment en mutualisant les forces de leurs écosystèmes respectifs entre la France et le Québec, il est très important de stimuler la formation de personnes expertes dans les vastes domaines couverts par les sciences quantiques en français. Cela permettra à la fois d'alimenter nos laboratoires et entreprises, mais aussi de profiter du formidable bassin de talents disponibles dans le réseau francophone notamment en Afrique, sachant qu'une bonne partie des études initiales dans ces domaines ne nécessitent que peu d'infrastructures matérielles complexes. Les échanges entre ces différents écosystèmes de formations sont à privilégier, notamment l'appui aux thèses de doctorat en cotutelle favorisant une ouverture scientifique et culturelle maximisée.

LE CALCUL OPTIQUE : DES PRÉMICES AUX HORIZONS QUANTIQUES

TRISTAN GAUTIÉ (X14)
docteur en physique
de l'École normale supérieure

Parent pauvre du calcul électronique, le calcul optique n'a pas encore réussi à trouver des applications dans lesquelles il ait un avantage indiscutable. Cela pourrait cependant changer bientôt grâce à de nouvelles techniques analogiques prometteuses et au développement du calcul quantique photonique.

La recherche en optique, qui est un des piliers les plus fertiles de la physique moderne, a livré au cours de son histoire des applications scientifiques et technologiques innombrables. Parmi les domaines qui ont particulièrement profité de ces progrès se trouvent les télécommunications, l'imagerie télescopique et microscopique, la chirurgie de l'œil et l'ablation industrielle, ou encore plus récemment la génération de nombres aléatoires et la cryptographie. Dans le domaine du calcul optique en revanche, si la lumière possède des avantages cruciaux, son potentiel n'a pas encore été complètement révélé. L'idée d'exploiter les propriétés de vitesse et de multiplexage de la lumière dans le but d'effectuer des calculs à haute fréquence est ancienne, mais elle s'est heurtée à des difficultés d'exécution et à la concurrence des succès gigantesques du calcul électronique. Aujourd'hui, des techniques prometteuses émergent, qui pourraient faire entrer le traitement optique de l'information dans une nouvelle ère. Cette ère est bien sûr celle de la seconde révolution quantique, caractérisée par une maîtrise de la lumière à l'échelle du photon, et du développement du calcul quantique photonique. Mais c'est aussi l'ère de techniques analogiques innovantes, qui nous réservent certainement des surprises.

Rêves du calcul optique…

La lumière se prête naturellement au traitement de l'information, qui implique de transformer un signal d'entrée, par différentes opérations, en un signal de sortie. En effet, pour une direction de propagation fixée, l'information optique est portée par un champ complexe dans le plan transverse, qui peut subir plusieurs transformations au cours de l'évolution dans le système optique. Le faisceau initial peut ainsi être modifié par le système, composé d'éléments comme des lentilles ou des milieux non linéaires et imagé en sortie sur un capteur photographique. L'exemple fondamental de transformation non triviale naturellement réalisée par un système optique est celui de la transformée de Fourier réalisée par une lentille dans son plan focal. Cet exemple permet déjà d'imaginer des applications dans le calcul de corrélation et a nourri le début de la recherche sur le calcul optique dans les années 1950. Les premiers processeurs optiques ont ainsi été appliqués avec succès au traitement de données de radar à synthèse d'ouverture, avant d'être remplacés par les techniques numériques.
Les atouts principaux de la lumière pour le traitement de l'information sont la rapidité de propagation de la lumière, qui limite le temps de calcul à une durée très courte, le faible coût énergétique du calcul et la possibilité

de propager l'information en espace libre sans interactions, ce qui permet des architectures parallèles. Ces atouts fondamentaux sont soutenus par les progrès technologiques des soixante-dix dernières années, qui ont apporté une grande flexibilité expérimentale à la table optique. Le plus important est sans doute le laser, apparu dans les années 1960, qui produit un faisceau cohérent. Les décennies suivantes ont apporté les modulateurs spatiaux SLM (*spatial light modulators*) qui permettent de façonner le profil du champ transverse d'un faisceau, dont la version la plus moderne, utilisée par exemple dans les vidéoprojecteurs, est le DMD (*digital micromirror device*). D'innombrables autres innovations, comme les composants non linéaires complexes, résonateurs et autres VCSELs (*vertical-cavity surface-emitting lasers*), ont multiplié les possibilités expérimentales.

… et désillusions

Au cours de cette aventure technologique, un axe de recherche central du calcul optique s'est heurté à un écueil insurmontable : celui de l'ordinateur numérique optique, capable d'exécuter une suite d'opération arbitraire sur un ensemble de bits, par l'intermédiaire de portes logiques à base de transistors optiques réalisés à l'aide d'un milieu non linéaire. Les transistors optiques ne passant pas à l'échelle en termes de miniaturisation et d'efficacité énergétique, cette tentative de rattraper l'informatique électronique s'est soldée par un lourd échec dans les années 1980. Il apparaît depuis lors que l'intérêt du calcul optique ne peut pas être de remplacer le calcul électronique, mais simplement de prendre en charge certaines tâches très précises pour lesquelles les techniques optiques analogiques sont plus adaptées, en s'abstrayant de l'encodage binaire. Malgré un intense effort de recherche depuis les années 1980, avec par exemple la conception de processeurs analogiques pour le calcul de corrélation et la détection de courbes paramétriques, la flexibilité et la performance du calcul électronique ont étouffé les techniques optiques, jusque dans le domaine des transformées de Fourier.

De nouvelles techniques prometteuses

Les progrès dans les technologies habilitantes comme les SLM ou les capteurs, dont les caractéristiques limitent la performance d'un processeur optique, permettent aujourd'hui d'espérer que les techniques optiques trouvent leur application dans la résolution de certaines tâches. À l'heure de l'explosion des réseaux de neurones, la recherche d'architectures de calcul neuromorphique particulièrement adaptées à ces structures est en →

© Daco

→ ébullition. Les processeurs optiques ont des atouts, comme l'implémentation naturelle du produit matriciel, et de nombreuses propositions émergent dans le domaine des PDNNs (*photonic deep neural networks*). Dans un domaine proche, la start-up française LightOn résout optiquement le problème de la projection aléatoire de grandes matrices, qui se pose dans certaines techniques d'apprentissage machine (*machine learning*). Par ailleurs, l'optimisation combinatoire à grand nombre de paramètres est un problème stratégique, car notoirement difficile à résoudre pour un ordinateur habituel, pour lequel des processeurs optiques originaux appelés machines d'Ising ont récemment obtenu des résultats prometteurs en étant capables d'extraire la configuration optimale d'un hamiltonien arbitraire.

Enfin, les processeurs analogiques optiques ont un fort potentiel pour la résolution de certaines opérations mathématiques précises, comme la simulation de dynamiques non linéaires complexes, qui sont très consommatrices de ressources sur un ordinateur classique. J'ai eu l'occasion de participer au projet de développement d'un tel simulateur optique non linéaire, dans le but de trouver des applications commerciales et cas d'usage industriels. La rigidité de ce genre de système et la faible capacité d'adaptation de la dynamique simulée, par rapport à la flexibilité des méthodes numériques, rendent malheureusement très difficile les perspectives d'adoption, mais cela reste un axe de recherche intéressant. Il est à noter que le développement de métamatériaux, aux propriétés électromagnétiques originales, sera certainement à l'avenir une source de flexibilité pour le calcul optique analogique.

> *"Le calcul optique promet d'entrer bientôt dans une nouvelle ère."*

Les débuts de l'ère du calcul quantique

Au-delà de ces techniques prometteuses, le calcul optique promet d'entrer bientôt dans une nouvelle ère. Aujourd'hui, le développement technologique permet le contrôle et la détection de photons individuels, ce qui ouvre la porte à des formes de calcul optique radicalement différentes : c'est l'ère balbutiante du calcul quantique. Le calcul quantique repose sur le fait que le photon est une particule élémentaire qui peut être vue comme un système quantique à deux niveaux, c'est-à-dire un qubit. Cette information quantique peut être encodée de différentes manières, par exemple sur le chemin parcouru par le photon dans un interféromètre, sur sa phase, sa fréquence ou encore son moment angulaire. Les opérations logiques comme les portes à un qubit sont ainsi réalisées par des séparateurs de faisceaux, lames d'ondes ou déphaseurs, et les portes à deux qubits par des interféromètres de type Mach-Zehnder. Dans la lignée des processeurs optiques décrits plus hauts, l'écosystème industriel est organisé autour d'une structure modulaire : sources de photons uniques d'un côté, puces optiques et enfin capteurs, avec des acteurs spécialisés dans chacun de ces dispositifs.

Les qualités et les espoirs du photon

En comparaison avec les autres supports explorés pour le calcul quantique, les photons ont l'avantage de la stabilité à température ambiante au cours de leur propagation, bénéficient des techniques de fabrication de semi-conducteurs CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) matures et de l'existence de sources de photons uniques, comme celles commercialisées par la start-up française Quandela. Les photons sont de plus une technologie transversale incontournable, car elle permet la communication à distance. Notons en revanche les taux d'erreur élevés en lecture, l'impossibilité de stocker les photons et les difficultés de conception pour une architecture permettant de passer à l'échelle, qui sont des freins à ne pas sous-estimer.

L'espoir est permis pour les prochaines années de voir la puissance du calcul quantique optique augmenter au fur et à mesure que des jalons technologiques seront passés, jusqu'à atteindre une taille critique nécessaire à la résolution de problèmes avec des applications intéressantes, comme l'étude de molécules pour la synthèse de médicaments ou la science des matériaux. Le calcul quantique photonique a déjà obtenu les galons de la suprématie quantique avec l'annonce récente du canadien Xanadu, pour le problème de l'échantillonnage bosonique gaussien qui n'a aucune application directe mais qui permet de nourrir des espoirs sur le potentiel du domaine à atteindre un réel avantage quantique sur un problème appliqué.

Enfin, notons que le progrès de ces techniques passera nécessairement par le développement accru d'applications métiers, dans le but de construire des algorithmes adaptés à la fois au support optique et aux problèmes les plus pressants des industriels partenaires. Les environnements numériques de développement spécifiques aux propriétés des systèmes optiques, comme la bibliothèque algorithmique Perceval de la start-up Quandela, sont ainsi des outils importants. ×

ETYMOLOGIX

À propos du quantique

PIERRE AVENAS (X65)

Le *quantique* est très présent dans la sphère médiatique. On évoque souvent la mécanique quantique, mystérieuse pour beaucoup, y compris pour les scientifiques eux-mêmes dans certains de ses aspects. On mise sur l'ordinateur quantique, à long terme cependant. Quant au mot *quantique*, son étymologie est simple, mais son histoire est complexe.

Le quantum des Romains, des juristes et des philosophes

En latin, l'adverbe interrogatif *quam* « à quel degré ? » se combine au démonstratif *tantus* « de cette grandeur » pour former l'adjectif interrogatif *quantus* « de quelle grandeur ? », en particulier au neutre, *quantum* « combien », d'où aussi *quantitas* pour une quantité, *a priori* quelconque.

En bas latin, le nom *quantum* désigne une quantité déterminée, par la nature ou par une décision humaine. Ainsi, en latin juridique, on parle d'un *quantum* de dommage ou d'indemnité. Le terme est aussi employé par les philosophes, notamment par Kant, en allemand *Quantum*, au pluriel *Quanta*. Dans la *Critique de la raison pure* (1781), Kant évoque le « *Quantum de la substance* » et il affirme par ailleurs que le temps et l'espace sont les deux « *Quanta* » originaires de notre intuition. Le *Quantum* de Kant est une sorte de quantité permanente et intuitive.

N.B. : le patronyme *Kant*, lié sans doute à *kanten* « tailler la pierre, le bois », est en tout cas sans rapport avec *quantum*.

Le quantum et les quanta des physiciens

Le physicien allemand Max Planck, pour expliquer le rayonnement thermique d'un corps en fonction de sa température, postule en 1900-1901 que les échanges entre ce rayonnement et la matière ne se font que sous forme de paquets d'onde électromagnétique d'énergie $h\nu$, où ν est la fréquence de cette onde. Le terme h, peut-être l'initiale de *Hilfsgrösse* « grandeur auxiliaire », est aujourd'hui la *constante de Planck*. En 1905, Einstein complète cette théorie en postulant que l'onde électromagnétique est elle-même constituée de ces paquets d'énergie, qu'il nomme en allemand *Energiequanta* (ils seront nommés *photons* en 1926). Et en 1906, Planck introduit le concept de *Wirkungsquantum*, traduit plus tard par *quantum d'action*. Au congrès Solvay de 1911, en présence d'Einstein, de Planck et d'autres sommités de la physique, Poincaré (X 1873, Mines) donne une communication *Sur la théorie des quanta*, publiée en 1912 et portant sur les mathématiques du *quantum* et de la *physique des quanta* (l'Académie recommande le pluriel *quantums*, sans succès). En anglais, c'est *quantum*, *quanta* et en allemand *Quant*, *Quanten*.

L'adjectif *quantique* est attesté en 1924 dans la *Théorie quantique des spectres*. La même année, Louis de Broglie établit lors de sa thèse le principe de dualité onde-corpuscule. Une onde est alors associée à tout électron dont la fonction d'onde, donnant sa probabilité de présence, suit l'*équation de Schrödinger* formulée en 1925. À partir de là, la *physique* et la *mécanique quantiques* (*meccanica quantistica* en italien, *quantum mechanics* en anglais et *Quantenmechanik* en allemand) ont pris leur essor. On évoque beaucoup de nos jours les *états quantiques*, dont le *chat de Schrödinger* illustre la possible et surprenante superposition, ainsi que l'*intrication quantique*, un concept qui intrigue vraiment (*intriguer* et *intriquer* sont des doublets, du latin *intricare* « embrouiller », d'où aussi *inextricable*).

Épilogue

Un ordinateur quantique (*quantum computer*) devra maîtriser le quantique dans tous ses états, faute de quoi il produirait d'inacceptables résultats *aléatoires* (du latin *alea* « jeu de dés »).

131e

BAL DE L'X

12 MAI 2023, PALAIS GARNIER, PARIS

Détail des formules sur le site **baldelx.org**
Ouverture des inscriptions le **15 décembre 2022**
Renseignements : info@baldelx.org

l'X
—AX—
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
ALUMNI

VIE DES ENTREPRISES

Quantique & HPC

PAGE 46
TERATEC / Hervé Mouren (X67)

PAGE 49
AWS FRANCE / Simone Severini et Mathieu Jeandron (X97)

PAGE 52
PASQAL / Loïc Henriet (X09)

PAGE 54
MULTIVERSE COMPUTING FRANCE / Michel Kurek (E19)

PAGE 56
QUANDELA / Pascale Senellart (X93) et Jean Senellart (X92)

Nouvelles technologies & Nouvelles carrières

PAGE 58
EDF / Nathalie Messer

PAGE 60
GIESECKE+DEVRIENT (G+D) / Gabrielle Bugat

PAGE 62
PORSCHE CONSULTING / Benoît Romac

PAGE 64
ARMTEK / Stefan Dragomir

Dossier publi-rédactionnel réalisé par FFE pour le service commercial de La Jaune et La Rouge.
Rédaction : Hannibal+. Contacts : Michel Baratta (michel.baratta@wanadoo.fr) - Tél. : 04 94 51 06 09 - Fax : 04 94 51 61 60
Pierre Dubreuil (pierre.dubreuil@revue-polytechnique.fr) - Tél. : 01 73 04 78 43 - Fax : 01 43 73 81 60
Stéphane Laborde (stephane.laborde@revue-polytechnique.fr) - Tél. : 01 73 04 78 43

ACCÉLÉRER LA MAÎTRISE ET LA DIFFUSION DU NUMÉRIQUE de grande puissance

Le numérique de grande puissance regroupe les supercalculateurs, la simulation et l'analyse de données, l'intelligence artificielle et demain le calcul quantique. Ce sont les éléments fondamentaux et structurants de la transformation du monde industriel à laquelle nous assistons depuis déjà plusieurs années. Dans ce cadre, la France et l'Europe doivent se mobiliser pour développer leur maîtrise de ces technologies et s'imposer comme des leaders dans ces domaines afin de préserver la compétitivité de leurs industries. *Hervé Mouren (X67), le directeur de TERATEC,* dresse pour nous un état des lieux et revient sur les enjeux et les sujets qui nécessitent une attention particulière.

Hervé Mouren (X67)

Pouvez-vous nous présenter Teratec et son périmètre d'action ?
Teratec est une initiative menée par de grands industriels qui a vu le jour en 2005 et qui regroupe aujourd'hui une centaine de membres, principalement des entreprises industrielles et technologiques, ainsi que des centres de recherche et des établissements d'enseignement supérieur. Son objectif et sa mission sont de faciliter la maîtrise des technologies numériques et d'accélérer leur diffusion et leur déploiement dans l'industrie.
À ce titre Teratec a accompagné au cours des quinze dernières années la généralisation du recours aux supercalculateurs et à la simulation, et plus récemment le développement rapide de l'intelligence artificielle. Et maintenant, nous préparons l'arrivée du calcul quantique.
Teratec organise tous les ans le Forum Teratec, qui est le grand moment d'échange en France entre chercheurs et industriels, fournisseurs et utilisateurs, et qui a lieu en juin en région parisienne.
Enfin, Teratec participe de façon très active à la nouvelle dynamique européenne sur ces sujets.

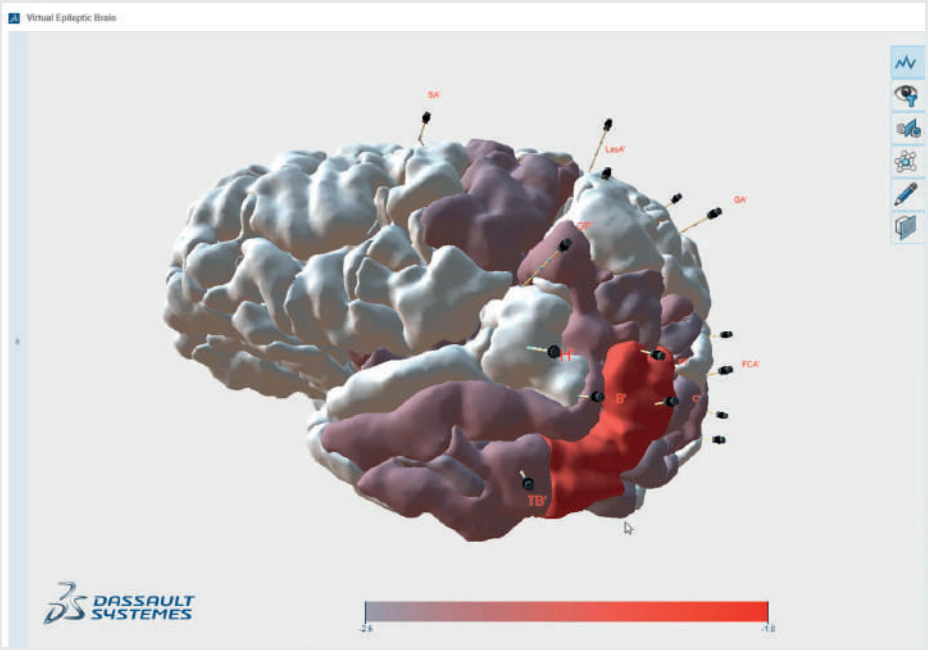
Au cours des dernières années, nous avons beaucoup entendu parler du HPC et des supercalcuteurs qui ont vocation à transformer le numérique et l'industrie. Concrètement, qu'en est-il ?
Le point de départ de cette révolution est la conjonction de l'explosion de la puissance de calcul et des progrès réalisés en matière de simulation et de modélisation. Si nous nous intéressons plus particulièrement à l'évolution de la puissance de calcul, on remarque que nous sommes passés d'un million d'opérations par seconde en 1964 à un milliard d'opérations par seconde en vingt ans. Et depuis la progression s'accélère, en 2022 nous en sommes au milliard de milliards d'opérations à la seconde. Cette accélération de la puissance de calcul nous permet de concevoir et de réaliser des analyses qu'on ne pouvait pas imaginer il y a dix ans.
À cela s'ajoutent les très grands progrès réalisés dans les outils de simulation et de modélisation. La transformation qui s'est opérée dans le numérique et maintenant dans toute l'industrie découle de cette conjonction de l'accélération de la puissance de calcul et de la puissance des outils de simulation et de modélisation. À partir de là, s'est aussi développé l'apprentissage machine qui permet de mettre en place des mécanismes nouveaux et de rupture. Et nous préparons l'arrivée de l'informatique quantique qui va apporter un nouveau dynamisme à l'industrie.

À l'échelle européenne et française, comment ce sujet stratégique est-il appréhendé ?

Il y a en Europe un consensus sur la nécessité d'investir massivement dans ces technologiques afin de rattraper les États-Unis qui ont une importante longueur d'avance aussi bien sur l'Europe que sur la France. C'est une nécessité absolue si l'on veut que l'Europe reste compétitive dans l'industrie et la recherche face aux États-Unis et à la Chine.

Aujourd'hui, la France et les pays européens se mobilisent pour accélérer leur maîtrise de ces technologies et leur diffusion. Des programmes de recherche avec une forte composante industrielle ont été lancés. C'est notamment le cas du programme EUROHPC. Lancé par la Commission européenne, ce programme de grande envergure doté d'un budget de 7 milliards d'euros pour la période 2021 à 2027 se concentre sur le développement des technologies, avec la construction de supercalculateurs parmi les plus puissants au monde, ainsi que sur le développement des usages dans de très nombreux domaines.

Pour sa mise en œuvre, la Commission a identifié, dans chaque pays, un acteur référent pour organiser et prendre en charge l'animation locale, la diffusion des informations et des bonnes pratiques dans le cadre de ce programme. En France, TERATEC est l'acteur qui a été désigné. Nous avons ainsi la responsabilité de ce centre de compétence, cofinancé par l'Europe et la France et réalisé en partenariat avec GENCI et le CERFACS. Nous travaillons notamment sur l'animation d'une place de marché autour de ces technologies qui recense les acteurs qui interviennent dans ces domaines, les expertises et les compétences accessibles, les offres de produits et de services ainsi que les formations existantes. En effet, l'une de nos fonctions principales est de mettre en place des passerelles entre ces technologies numériques et l'ensemble du monde industriel.



Forum Teratec - Jumeau numérique en médecine – Intervention de Dassault Systèmes sur le jumeau virtuel du cerveau épileptique pour l'aide à la décision chirurgicale (Copyright Dassault Systèmes).

Quels efforts doivent encore être fournis pour garantir une certaine souveraineté sur ces questions ?

La France et l'Europe doivent fournir de nombreux efforts et être prêtes à investir massivement. Les Américains travaillent sur ce sujet depuis plus de 30 ans et allouent des budgets colossaux au développement de ces technologies. La Chine s'est emparée du sujet plus récemment et investit massivement pour développer sa capacité technologique aussi bien sur le plan industriel qu'en termes de recherche.

Pour relever ce défi, nous avons de nombreux atouts, l'école française de mathématiques, le haut niveau de la recherche informatique, et la bonne articulation en Europe entre le monde industriel et le monde de la recherche. Le grand challenge devant nous est de continuer à former les générations d'ingénieurs de haut niveau dont nous avons besoin. C'est là que se fera la différence.

Hébergé au TGCC du CEA sur la Technopole Teratec, le supercalculateur Joliot Curie répond aux besoins des communautés de recherche nationales et internationales (Copyright_CEA_P_Stroppa).

Quels sont les usages qui sont déjà déployés à l'heure actuelle et quels sont les secteurs et domaines qui en profitent déjà ?

Ces technologies numériques de grande puissance modifient nos activités dans de très nombreux domaines. Dans le monde industriel, il y a une nécessité de se reconstruire en intégrant ces technologies et en les combinant aux savoir-faire propres à chaque métier. Au-delà de la dimension technologique, cela ouvre aussi des perspectives en termes de repositionnement sur des pans entiers de l'activité industrielle. Historiquement, ce sont les grands secteurs industriels classiques comme l'aéronautique, l'automobile, l'énergie qui se sont d'abord emparés de ces technologies notamment dans le cadre de leur activité d'ingénierie. Nous concevons ainsi des voitures, des avions et des bâtiments de manière numérique depuis déjà de nombreuses années.

Quels sont ceux qui restent à développer ou qui nécessitent une réflexion ?

Le premier domaine qui nous vient à l'esprit est bien évidemment celui de la santé, car cela nous touche tous. Les avancées potentielles en termes de médecine et de santé sont illimitées et dans tous les domaines : la détection, la recherche de nouveaux médicaments, la mise au point de nouveaux traitements, l'usage du jumeau numérique pour modéliser les organes... On peut, par exemple, imaginer que demain un opticien ou un ophtalmologue pourra générer le jumeau numérique de l'œil d'un patient afin de déterminer les correctifs avant de les appliquer à ce dernier. Et c'est une méthodologie qui pourra être appliquée à tous les organes : cœur, poumon, reins...

Ces évolutions ont vocation à toucher la recherche fondamentale dans sa globalité, mais également la plupart des secteurs économiques et industriels : depuis l'agriculture et l'agroalimentaire, jusqu'aux loisirs et même la culture !

Toutefois, la puissance de ces technologies génère aussi des risques auxquels il faut être attentifs. J'en vois principalement deux. Le premier concerne les données personnelles, collectives, techniques, financières et politiques. Au vu du développement de l'analyse des données et de leur utilisation en termes d'apprentissage, il est essentiel de renforcer leur protection et sécurisation. Le second risque est lié à la cybersécurité qui va devenir un sujet majeur dans les prochaines années. Il est impératif d'apprendre à s'en prémunir dès aujourd'hui.

Quel message souhaiteriez-vous adresser à nos lecteurs sur ces thématiques ?

Pour accompagner ces évolutions, il y a un enjeu relatif au développement des compétences et à la formation. Au-delà, la clé du succès de cette transformation et révolution est la capacité à s'inscrire dans une démarche de co-construction (co-design) entre les fournisseurs de technologies et les industriels, qui sont les utilisateurs finaux de ces technologies. Il est essentiel de développer cette capacité à associer le savoir-faire propre d'un domaine avec ce que ces technologies peuvent permettre. Les leaders de demain seront les pays, les industries et les entreprises qui vont accélérer et développer leur maîtrise de ces technologies.

AWS DÉMOCRATISE L'ACCÈS aux ordinateurs quantiques

Simone Severini, Directeur du Quantum Computing au sein de AWS, dresse pour nous un état des lieux du développement des technologies quantiques et revient sur le positionnement de AWS sur ce marché en plein développement. Entretien.

Simone Severini

Où en sommes-nous dans le développement des technologies quantiques ?
L'informatique quantique a le potentiel de contribuer, en profondeur, à la science et à la technologie. Nous n'en sommes qu'aux prémices ! Il y a encore beaucoup à accomplir, tant sur le développement du matériel que sur l'écriture d'applications pour utiliser les capacités quantiques. Cela dit, nous pensons que c'est le moment idéal pour fournir un service qui aidera nos clients à commencer à planifier le futur avec cette technologie. C'est l'objectif d'Amazon Braket : accélérer l'innovation en démocratisant l'accès aux ordinateurs quantiques.

Pouvez-vous nous présenter les avantages d'Amazon Braket ?
Lancé en 2019, Amazon Braket est notre service d'informatique quantique entièrement géré et conçu pour accélérer la recherche scientifique et le développement logiciel dans le domaine de l'informatique quantique. Le service permet de concevoir, tester et exécuter des algorithmes quantiques sur AWS. Il comprend l'accès à différents types de calculateurs quantiques, un environnement de développement unifié, un choix de simulateurs de circuits classiques et une exécution entièrement gérée d'algorithmes hybrides quantiques/classiques. Amazon Braket permet aussi d'utiliser des simulateurs pour tester des applications sur des environnements classiques avant de les exécuter sur des ordinateurs quantiques. C'est important, car bon nombre d'applications quantiques n'en sont qu'à leurs balbutiements, et cette flexibilité permet aux clients d'affiner leurs idées, d'itérer et de mettre leurs projets à l'échelle.
Les clients bénéficient aussi de l'écosystème AWS qu'ils connaissent et apprécient avec, par exemple, les données et les applications déjà présentes sur AWS, la sécurité, le stockage ou l'IoT. Il leur est possible de comparer différentes technologies et de passer de l'une à l'autre en ne changeant qu'une ligne de code.
Il s'agit d'avoir une vision de la manière dont l'informatique quantique s'intégrera un jour dans une infrastructure informatique basée sur le cloud. Bien que les usages actuels soient expérimentaux, il est important d'envisager dès à présent les problématiques opérationnelles complexes telles que l'usage, la sécurité, les données et la gestion des ressources.

Pouvez-vous nous présenter l'AWS Center for Quantum Computing ?
Amazon a ouvert l'AWS Center for Quantum Computing en octobre 2021. Dans ce centre, les scientifiques et les ingénieurs AWS travaillent avec le monde universitaire à la construction d'un ordinateur quantique tolérant aux erreurs – qui pourra ensuite être accessibles à nos clients tant internes qu'externes. Nous avons décidé de construire notre propre ordinateur quantique parce que nous croyons en une vision à long terme qui se concentre sur la correction d'erreurs.
Cette nouvelle installation est dédiée aux efforts d'informatique quantique d'AWS et comprend des bureaux pour accueillir nos équipes de recherche quantique et des laboratoires comprenant l'équipement scientifique et les outils spécialisés pour la conception et l'exécution de dispositifs quantiques.

"Lancé en 2019, Amazon Braket est notre service d'informatique quantique entièrement géré et conçu pour accélérer la recherche scientifique et le développement logiciel dans le domaine de l'informatique quantique. Le service permet de concevoir, tester et exécuter des algorithmes quantiques sur AWS."

Pouvez-vous nous donner quelques exemples d'utilisation ?
AWS collabore avec de nombreuses entreprises et centres universitaires à travers le monde. Par exemple, AWS s'est associé à BMW pour étudier la pertinence de l'approche quantique dans ses problématiques industrielles (50 sujets potentiels ont été soumis) via un challenge ouvert qui s'est terminé fin 2021 avec des cas d'usages pratiques (optimisation du placement des capteurs, ...). AWS collabore avec le monde de la finance pour étudier des cas d'usages dans la gestion d'asset (Fidelity) mais aussi pour les systèmes de risques ou de définition des prix (JP Morgan Chase).
Un autre exemple est le partenariat avec l'Institut national italien de physique nucléaire (INFN), annoncé en 2021 avec comme objectif d'élargir les connaissances scientifiques autour de l'informatique quantique pour identifier des applications potentielles en physique des hautes énergies et en physique fondamentale. AWS a également annoncé une alliance avec l'Université de Harvard pour relever les défis scientifiques fondamentaux associés à la construction de réseaux quantiques.
Il y a aussi des start-up qui utilisent Amazon Braket pour répondre aux besoins futurs de l'informatique quantique. Citons PASQAL qui construit des processeurs quantiques à partir de tableaux 2D et 3D d'atomes neutres et qui exécute son logiciel de simulation chimique en tirant parti d'Amazon Braket.

Comment les entreprises peuvent-elles se préparer à l'arrivée de l'ère quantique ?
Le manque de compréhension de la technologie constitue le principal obstacle à l'informatique quantique. Ce sera un long processus pour les entreprises et il faut définir les attentes dès à présent.
L'informatique quantique est encore en phase expérimentale, mais il est important de commencer à réaliser des preuves de concept pour de futures applications réelles.
Pour les organisations qui participent déjà à l'informatique quantique : continuez ! Pour les autres, nous les encourageons à débuter dès à présent leur réflexion autour du quantique, à identifier une personne dans leur équipe – CTO ou ingénieur – pour analyser les besoins de l'entreprise autour du quantique et en quoi cette technologie peut être une opportunité. Et pour conclure, voici quelques recommandations concrètes. Expérimentez ! Un service géré comme Amazon Braket peut donner à quiconque une chance d'explorer différentes approches de l'informatique quantique.
Si vous souhaitez passer à l'étape suivante, un partenariat avec un fournisseur de technologie disposant d'une équipe d'experts internes comme Amazon Quantum Solutions Lab peut être utile pour identifier les applications les plus prometteuses pour votre entreprise. Ensuite, vous pouvez vous tourner vers les universités dotées d'équipes de recherches en informatique quantique, qui peuvent aider à comprendre les possibles cas d'utilisation, à pallier le manque de talents internes et à former la prochaine génération de scientifiques quantiques.
Enfin, le développement de centres quantiques nationaux est une occasion pour les chercheurs de s'associer et de développer une approche holistique pour tirer pleinement parti de cette technologie émergente. Le partenariat public/privé permettra d'avoir l'ensemble des ressources requises dans une même structure.

Trois questions à Laurent Guiraud, cofondateur de ColibrITD

Laurent Guiraud

Dans quel cadre avez-vous recours aux solutions d'AWS ?
ColibrITD développe une plateforme logicielle qui permettra de profiter de l'accélération quantique. Pensée comme une « Platform as a Service », elle est orientée utilisateurs et sur les cas d'usages relatifs à la déformation des matériaux. Dans cette démarche, nous utilisons Amazon Braket pour accéder soit à des simulateurs, soit à des machines quantiques.
Nous commençons par le volet simulation pour affiner les algorithmes puis les exécutons sur des machines réelles. En particulier, nous utilisons les machines IonQ disponibles sur Amazon Braket.

Pourquoi avoir choisi AWS ?
Pour deux raisons principalement. Premièrement, nous avons accès à de vraies machines. Dans notre cas, nous avons utilisé IonQ. Et deuxièmement, nous utilisons l'algorithme VQA (variational quantum algorithm) dont l'utilisation est assez complexe. La solution Amazon Braket d'AWS met à disposition un package intégré et facilement utilisable. Cela nous permet un gain de productivité au niveau des tests. Amazon Braket permet de se concentrer sur les utilisateurs et leurs cas d'usages. C'est la possibilité pour des entreprises qui font déjà du HPC, et dont les données sont dans AWS, de franchir un nouveau cap vers le quantique.

Ce partenariat avec AWS vous permettra aussi de proposer vos solutions via leur marketplace...
En effet ! Demain, si des entreprises veulent tester la déformation des matériaux ainsi que d'autres cas sur lesquels nous travaillons comme la combustion, elles pourront accéder à notre solution directement depuis la marketplace d'AWS et se concentrer sur leurs cas d'usage. Aujourd'hui, la largeur de l'offre d'AWS (plus de 200 produits) nous permet de proposer à nos clients une solution complète et sécurisée autour de la solution Amazon Braket. C'est la possibilité pour nous d'enrichir le cœur quantique de notre solution.

LA SÉCURITÉ ET LA CONFORMITÉ DES DONNÉES au cœur du Cloud d'AWS

Entretien avec Mathieu Jeandron (X97), manager des architectes solutions pour le secteur public en France et au Benelux.

Mathieu Jeandron (X97)

Comment appréhendez-vous la question de la sécurité des données ?
De plus en plus, le recours aux capacités de calcul intensif n'est plus réservé au monde de la recherche fondamentale. Aujourd'hui, on constate de plus en plus souvent un continuum entre les systèmes d'information classiques, d'où sont extraites les données, et les capacités de calcul intensif pour les simulations par exemple. C'est un phénomène qu'on observe dans tous les domaines : santé, industrie, finance…
Ainsi, lorsque le calcul intensif se place dans le cloud, il est naturel et essentiel de traiter la question de la confidentialité des données qui sont traitées dans le même continuum de sécurité, ainsi que de protéger la confidentialité et la propriété intellectuelle des algorithmes créés et utilisés par des chercheurs. Il s'agit de répondre aux plus hauts niveaux de sécurité, comparables à ceux que nous connaissons dans le monde habituel des systèmes d'information les plus sensibles. Cet enjeu relatif à la sécurité et à la conformité des données est au cœur des priorités d'AWS.

Comment cela se traduit-il ?
Cela se traduit à deux niveaux : D'une part, nous avons conçu nos infrastructures et nos services de façon sécurisée à l'origine. D'autre part, nous mettons à la disposition de nos clients de nombreux outils afin qu'ils puissent mettre en œuvre leur propre politique de sécurité dans le cloud AWS en matière de chiffrement, de cloisonnement réseau, de détection de menaces, de réaction aux incidents.
Il est important de comprendre que notre position est celui d'un fournisseur de technologies : nos clients conservent en permanence la propriété et le contrôle de leurs données et de leurs contenus sur AWS. Ils définissent le lieu de stockage et de traitement de la donnée, la gestion d'accès, les modalités de chiffrement des données, les outils à utiliser (solutions AWS ou tiers…). C'est à la fois un engagement légal et une réalité technique que les clients peuvent constater directement. En outre, ce sont également des caractéristiques vérifiées par nos nombreuses certifications de conformité avec les normes et standards applicables. En parallèle, nos clients peuvent utiliser AWS en conformité au Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD), nous avons également fait certifier nos principaux services conformes au code de conduite CISPE validé par la CNIL, et obtenu la certification HDS (Hébergeur de Données de Santé).

Quelles sont les principales perspectives dans le domaine de la sécurité ?
Nous travaillons en permanence pour aller plus loin pour protéger les systèmes et donner le niveau d'assurance attendu par nos clients, et investissons largement dans ce domaine. Par exemple, le système d'hypervision sur lequel nos services AWS s'appuient a été complètement repensé pour renforcer l'isolation des systèmes du client vis-à-vis de l'opérateur cloud et vis-à-vis des autres clients : la plupart des fonctions habituelles de l'hyperviseur sont désormais déléguées à des composants matériels dédiés, ce qui nous permet par exemple de supprimer tout mécanisme qui permettrait à un système ou une personne physique de se connecter à un serveur, et diminue drastiquement les risques de vulnérabilités liés au processeur ou aux logiciels des systèmes hôtes. Autre exemple : nous développons des outils de raisonnement formel automatisés (raisonnement de logique mathématique) que nous appliquons notamment pour vérifier la sécurité de notre implémentation des algorithmes de chiffrement en transit (TLS), ainsi que la sécurité du code de boot de nos serveurs. Par défaut, tous nos clients bénéficient de cette isolation et de ce niveau formel de sécurité prouvée dès qu'ils utilisent une machine virtuelle AWS.

Comment les utilisateurs peuvent-ils appréhender ces questions ?
Cela restera toujours de la prérogative des clients de définir leurs attentes en matière de sécurité et de conformité, dans le cadre du projet qu'ils sont en train de mener.
À partir du moment où les risques à couvrir sont clairement identifiés et mis en regard des autres enjeux notamment de rapidité d'exécution, de maîtrise des coûts, de performance, il est alors relativement simple d'avoir accès au bon niveau d'expertise technique pour décider des outils et configurations adaptés.

LE QUANTIQUE : une révolution à portée de main pour toutes les industries !

Start-up française spécialisée dans le calcul quantique, PASQAL poursuit son développement afin de renforcer son positionnement et de faciliter le recours aux ressources quantiques. ***Explications de Loïc Henriet (X09), CTO de PASQAL.***

Loïc Henriet (X09)

Quelle a été la genèse de PASQAL et quel est son positionnement actuellement ?

PASQAL est une start-up française qui fabrique des processeurs quantiques. Elle a vu le jour en 2019 et est issue des travaux de deux chercheurs au CNRS, Antoine Browaeys et Thierry Lahaye, qui travaillent depuis plus d'une décennie sur la manipulation d'atomes individuels par des lasers à l'Institut d'Optique (Palaiseau). Cette thématique de recherche s'appuie sur l'excellence du laboratoire en physique quantique, acquise dans la lignée des travaux d'Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022 pour ses travaux fondateurs sur l'intrication quantique. Avec la maturation de la technologie, Alain Aspect, Antoine Browaeys et Thierry Lahaye ont alors pris la pleine mesure de l'importance de faire passer ces travaux académiques dans le monde industriel. Ils se sont alors associés au physicien et ingénieur Georges-Olivier Reymond pour créer PASQAL, dans le but de construire et commercialiser les premiers processeurs quantiques fonctionnant sur cette technologie. J'ai personnellement rejoint PASQAL dès juin 2019, et je suis actuellement le directeur technique (CTO) de l'entreprise.

Aujourd'hui, PASQAL emploie une centaine de personnes de plus de 18 nationalités différentes. Nous avons ouvert la première usine de processeurs quantiques de France à Massy, avec des capacités de production dédiées et des équipes de recherche. L'entreprise est présente en Europe avec des bureaux à Massy, Amsterdam et Londres mais aussi en Amérique du Nord avec des bureaux au Québec et à Boston. Ayant récemment franchi la barre des 350 qubits, nous sommes confiants d'atteindre 1 000 qubits avant la fin de l'année 2023. Nous avons une stratégie dite 'full-stack', dans la mesure où nous développons aussi les couches logicielles supérieures et les modules applicatifs avec plus de vingt clients renommés, comme CACIB, EDF, BMW, BASF, LG ou d'autres. Ce positionnement nous permet de développer les applications qui fonctionnent le mieux sur nos processeurs, car nous connaissons ses forces et ses faiblesses. La collaboration avec des industriels guide aussi nos développements, car nous pouvons identifier facilement les fonctionnalités à déployer pour répondre à leurs besoins.

Au cœur de votre activité, on retrouve donc le quantique. Qu'en est-il ?

Le quantique occupe évidemment une place fondamentale dans notre entreprise !

Nos 'qubits', briques élémentaires pour l'informatique quantique, sont des atomes individuels. Pour réaliser des calculs, l'information est encodée dans les niveaux électroniques distincts de ces atomes. La manipulation de cette information est réalisée par des séquences de pulses laser ou des champs micro-onde. Nous travaillons donc avec des particules manipulées individuellement, ce qui requiert un contrôle extrêmement fin et une maîtrise de l'interaction lumière-matière au niveau élémentaire.

L'impact de la physique quantique ne s'arrête pas au hardware. L'informatique quantique est une révolution totale de la façon de faire des calculs, il y a beaucoup à re-construire et à ré-imaginer afin de repenser le calcul informatique sous l'angle quantique.

Du fait de l'omniprésence de la physique quantique dans notre activité, du hardware au software, une grande partie de nos collaborateurs ont des profils très techniques, avec des formations d'ingénieurs et très souvent des thèses en physique quantique ou dans des domaines connexes.

Quels sont les projets qui vous mobilisent actuellement et où en êtes-vous dans votre développement ?

Nous sommes en pleine croissance et avons une forte activité de recherche et développement pour améliorer nos processeurs avec trois axes majeurs de développement :

nombre de qubits, qualité des opérations, et nombre d'opérations réalisées par seconde. Des avancées selon ces trois axes sont nécessaires pour faire fonctionner nos processeurs dans des régimes inaccessibles pour les ordinateurs classiques. Ces travaux s'inscrivent dans la durée et sont menés en lien avec des laboratoires de recherche en France, comme l'institut d'optique ou Sorbonne université. Mais nous nouons aussi des partenariats à l'étranger, comme avec l'université de Sherbrooke au Québec, ou avec l'université de Chicago.

En parallèle, nous passons véritablement à l'échelle industrielle. Dans ce cadre, nous avons déjà vendu deux processeurs quantiques à des centres de calcul haute performance en France et en Allemagne. Livrer ces machines représente un défi technique très important, car il faut convertir une expérience de physique expérimentale en un matériel de calcul haute performance qui soit capable de fonctionner dans un environnement industriel moins contrôlé qu'un laboratoire de recherche. En outre, nous avons décidé d'ouvrir un accès cloud à nos processeurs dès cette année. Brancher de telles machines sur le cloud et à les rendre accessibles par le plus grand nombre est une véritable première dans notre domaine d'activité.

La généralisation de l'accès à nos machines, que ce soit via notre cloud ou directement grâce aux centres de calcul, va nous permettre d'explorer de nombreux cas d'usage avec nos clients et partenaires, avec pour objectif central d'être les premiers à atteindre un avantage quantique opérationnel, où l'utilisation de nos machines quantiques procurera un gain concret par rapport à des machines classiques.

Quels enjeux et problématiques actuels ambitionnez-vous d'aborder avec vos solutions ?

Nous avons la conviction que le développement de l'informatique quantique va entraîner des changements profonds et significatifs pour de nombreuses industries. Le quantique est une technologique de rupture qui va impacter tous les métiers : énergie, chimie, logistique, nouveaux matériaux et batteries…

Nous travaillons, par exemple, sur le smart-charging, qui vise à optimiser le plan de recharge d'une flotte de véhicules électriques, avec EDF ; sur l'optimisation du réseau haute tension avec RTE ; sur la prévision des risques de crédit avec CACIB ; sur la modélisation climatique avec BASF ; ou encore sur l'analyse de déformations mécaniques avec BMW…

Grâce à l'exploration de toutes ces problématiques, nous souhaitons atteindre un avantage quantique industriel dès 2024. Concrètement, un avantage quantique peut prendre plusieurs formes : accéder à une meilleure solution, à une solution de qualité équivalente plus rapidement, réduire l'empreinte énergétique des calculs… C'est, d'ailleurs, une des forces de nos processeurs quantiques qui ne consomment que quelques kilowatts, bien moins que les grands centres de calculs haute performance classiques. Et nous sommes fiers de pouvoir, à notre niveau, contribuer à long terme à une plus grande sobriété énergétique dans les solutions de calcul haute performance.

Au niveau académique, nous avons d'ores et déjà atteint cet avantage quantique en 2021. Plus concrètement, nous avons étudié comment un matériau magnétique se comporte à très basse température, dans un régime hors de portée pour des supercalculateurs classiques. Ces travaux ont été publiés dans la prestigieuse revue *Nature*.

Nous souhaitons poursuivre ces efforts en science des matériaux, avec l'ambition de contribuer au développement de matériaux exotiques avec des propriétés intéressantes pour l'industrie.

Premier processeur quantique industriel développé par PASQAL.

Quels sont vos principaux enjeux et vos perspectives ?

Nous voulons consolider notre position de leader mondial dans notre domaine, et démontrer concrètement que notre technologie est la plus performante. Les technologies concurrentes, comme les qubits supraconduteurs ou les ions piégés, ont vocation à subsister pendant encore quelques années. Toutes les technologies auront des succès, certaines auront également des échecs. L'enjeu principal est donc d'essayer d'exploiter au mieux le potentiel des atomes neutres dans un horizon de temps le plus proche possible, alors que des concurrents américains comme Google, IBM ou Amazon ont choisi de travailler sur d'autres technologies.

LE QUANTIQUE : un potentiel encore insoupçonné !

Aujourd'hui se dessine et se confirme le potentiel des technologies et de l'informatique quantiques. *Michel Kurek (E19), directeur général de Multiverse Computing France*, dresse pour nous un état des lieux et revient sur le positionnement de son entreprise. Rencontre.

Michel Kurek (E19)

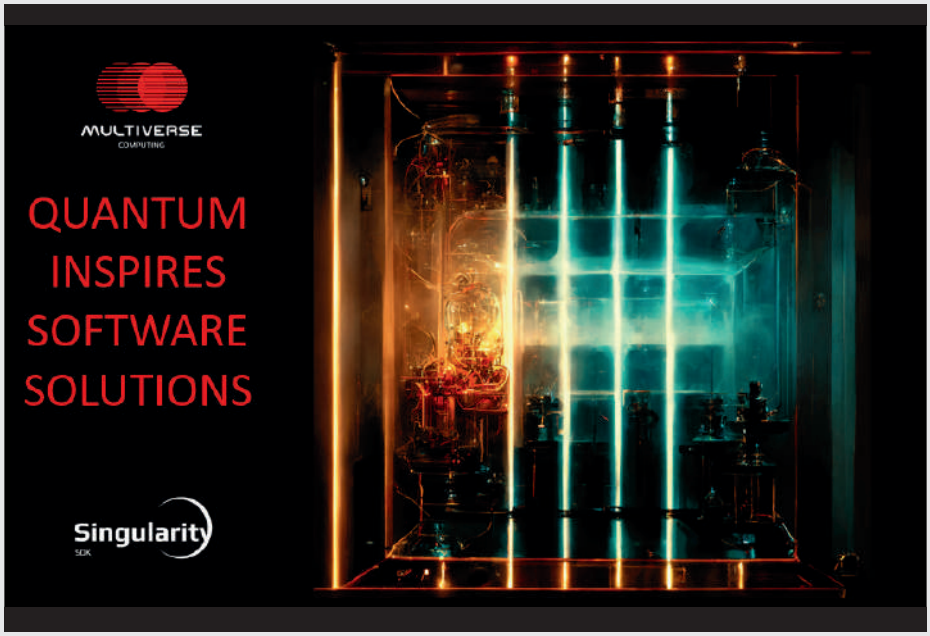
Nous entendons de plus en plus parler de révolution quantique et d'informatique quantique. De quoi s'agit-il ?
La mécanique quantique est centenaire. C'est la branche de la physique qui étudie et décrit les phénomènes fondamentaux à l'œuvre dans les systèmes physiques à l'échelle moléculaire, atomique et subatomique. Au XXe siècle, la mécanique quantique a permis des inventions majeures comme l'IRM, les horloges atomiques, le GPS... Selon moi, les plus marquantes sont le laser ou le transistor, qui sont les éléments de base de nos ordinateurs et smartphones, et ainsi de notre civilisation de l'information et de la télécommunication. Aujourd'hui, nous assistons à une seconde révolution quantique. La première avait permis de comprendre le fonctionnement des particules de façon collective. Les progrès scientifiques et technologiques des 40 dernières années ont permis de développer notre capacité à manipuler des objets quantiques (atomes, électrons, photons) de façon individuelle pour y stocker, traiter, lire de l'information et même faire des calculs avec. À partir de là une nouvelle génération d'appareils a émergé, dont certains sont déjà commercialisés. Ils ont vocation à révolutionner divers domaines tant ils surpasseraient les performances des technologies existantes.
En métrologie, on comprend que les objets quantiques, par leur taille, sont extrêmement sensibles aux influences externes. Cela les rend idéaux pour la réalisation de mesures de grandeurs physiques avec une grande précision. En matière de télécommunications, une des lois fondamentales de la physique quantique est que l'on ne peut pas copier de l'information quantique, on est donc à l'aune d'une ère où les communications seraient parfaitement protégées. Enfin les ordinateurs quantiques pourraient effectuer des calculs totalement inaccessibles aux HPC classiques, ce qui profiterait à de nombreuses industries (finance, chimie, sciences des matériaux...).

D'où viendrait alors la puissance du calcul quantique ?
Il faut évoquer deux principes fondamentaux de la mécanique quantique qui sont à l'œuvre pour expliquer la capacité qu'aurait un ordinateur quantique à mener des calculs plus rapidement qu'un ordinateur conventionnel : la superposition et l'intrication.
En informatique classique, l'unité d'information, le bit, peut prendre la valeur 0 ou 1. En informatique quantique, le qubit (équivalent du bit) peut prendre les états 0 et 1 en même temps, dans une certaine proportion. On parle alors de superposition. Ainsi, si en informatique classique, on souhaite calculer la valeur d'une fonction pour les valeurs en entrée 0 et 1, on est obligé de faire le calcul l'un après l'autre. Avec un qubit en état de superposition, on peut ne faire appel qu'une fois au calcul et on obtient une sorte de calcul parallèle natif. Quant à l'intrication, il s'agit d'une forme de corrélation forte entre deux qubits à l'image de l'intrication pouvant exister entre des particules quantiques même espacées l'une de l'autre par des milliards de kilomètres.

Quelles sont les technologies disponibles pour construire un ordinateur quantique ?
Il y en a principalement trois : celle qui utilise les atomes neutres ou chargés électriquement (ion) pour stocker l'information ; la photonique qui va utiliser les photons ; celle dans laquelle des dispositifs artificiels vont répliquer les principes de mécanique quantique à l'image de ce qui se passe dans les atomes réels. Ce sont souvent les électrons qui sont ici à l'œuvre. Ces pistes sont explorées aujourd'hui par les laboratoires de recherche, les grands groupes et les start-up. Chacune a des avantages et des inconvénients. Actuellement nul n'est capable de prédire laquelle ou lesquelles seront les gagnantes dans 5, 10 ou 20 ans. L'informatique quantique reste un domaine où des avancées technologiques seront nécessaires pour être capable de délivrer une machine universelle qui aurait un avantage réel sur

les supercalculateurs conventionnels. Les qubits utilisés aujourd'hui ont tendance à perdre rapidement l'information stockée et les opérations qui leur sont appliquées engendrent des erreurs de calculs trop importantes. Néanmoins les progrès conjoints aux niveaux algorithmiques et matériels laissent entrevoir des premiers succès dans le cadre d'applications bien spécifiques.

Dans ce contexte, Multiverse Computing est agnostique au matériel et développe une solution applicative nommée Singularity qui, du point de vue de nos clients, est transparente au type d'ordinateur quantique utilisé. Multiverse Computing est aussi experte de ce que l'on appelle l' « inspiré du quantique » (« quantum-inspired ») qui vise à transposer un formalisme mathématique puissant utilisé depuis des décennies en physique et chimie quantiques dans des domaines d'application autres : industriel, finance, énergie. Ce traitement permet dans de très nombreux cas de réduire la complexité du problème initial et de pouvoir le résoudre sur des ordinateurs conventionnels.



Qu'en est-il des applications de l'informatique quantique ?

L'ordinateur quantique pourrait surpasser l'ordinateur classique dans la résolution de problèmes dont la complexité augmente exponentiellement avec la quantité des données à traiter. L'informatique quantique pourrait ainsi avoir des applications concrètes dans des secteurs utilisant de l'optimisation combinatoire, la simulation numérique moléculaire et donc la science des matériaux, de la cryptanalyse, de l'intelligence artificielle… Et cela est le cas dans le monde de la finance, de la chimie, de la pharmaceutique, de l'aéronautique, de l'automobile, de la logistique ou encore de l'énergie… D'ailleurs, une récente étude du cabinet BCG estime que la valeur ajoutée de l'informatique quantique pour ces secteurs sera entre 450 et 850 mds de dollars par an à l'horizon 2040.

Prenons l'exemple de la finance. Quelles sont les applications possibles ?

Les acteurs de l'industrie financière sont, depuis toujours, très enclins à adopter des technologies de pointe comme les technologies quantiques. À l'instar des investissements massifs effectués par certains hedge-funds pour optimiser la vitesse de transmission des informations financières, les investissements privés dans le quantique commencent à décoller. Des banques comme Goldman Sachs, JP Morgan ou encore BBVA et Crédit Agricole CIB, en Europe, s'y intéressent de plus en plus.

En 2018, les fondateurs de Multiverse Computing avaient déjà publié un article scientifique précurseur sur les cas d'usage de l'informatique quantique pour la finance. Dans ce cadre, les principales problématiques relèvent de l'optimisation (portefeuille d'actifs financiers…), de la simulation notamment pour le calcul des risques, du machine learning (pricing d'instruments financiers complexes, la gestion de portefeuille ou la détection de fraude…). C'est, d'ailleurs, sur ce dernier volet que l'informatique quantique peut apporter une très forte valeur ajoutée.

Et pour conclure ?

En finance les critères ESG jouent un rôle croissant dans les choix d'investissement, ce qui complexifie de plus en plus les modèles de décision mathématiques. Le calcul quantique sera également ici un outil précieux. C'est aussi le cas dans le domaine des énergies renouvelables et de leur intégration dans les smart-grids. Je suis convaincu que les technologies quantiques et particulièrement l'informatique quantique pourraient contribuer à l'atteinte des objectifs de développement durable. De nombreux cas d'usage du quantique visant à atténuer/à réduire les causes/effets du changement climatique sont recensés. Les défis logiciels, technologiques et d'ingénierie qui se posent pour le développement des technologies quantiques sont encore nombreux mais les enjeux sont primordiaux et les équipes de Multiverse Computing sont heureuses de contribuer à ces développements.

EN BREF

Multiverse Computing est une start-up créée en 2019 en Espagne. Aujourd'hui, elle opère au Canada, en Allemagne et en France. Multiverse Computing se positionne comme un acteur majeur dans le domaine du développement de logiciels quantiques avec une position de leader pour les applications en finance et dans des secteurs variés comme l'énergie, le smart manufacturing, l'automobile.

QUAND LE QUANTIQUE rencontre le HPC...

Le quantique est désormais une réalité. Sur ce secteur en plein développement, on retrouve la pépite technologique française, *Quandela*, créée il y a cinq ans et qui propose des produits et une plateforme de calcul quantique uniques. Passionnés par leur métier et mariés dans la vie, *Pascale Senellart (X93), cofondatrice de la start-up, et Jean Senellart (X92), Chief Product Officer,* répondent à nos questions dans cet entretien croisé sur l'évolution du HPC et du quantique, le positionnement de la start-up, ses solutions et ses vecteurs de différenciation sur un marché en plein essor.

Pascale Senellart (X93)

Jean Senellart (X92)

Bio express
Elle est jône, il est rôuje, Pascale et Jean Senellart se sont rencontrés sur le « platâl ». À la sortie de l'école, ils ont tous deux réalisé des thèses, l'une en physique quantique l'autre en informatique appliquée au traitement du langage naturel. Pascale a ensuite rejoint le CNRS en 2002 et s'est intéressée à explorer l'optique quantique dans des composants semi-conducteurs. Ses recherches ont donné lieu à plusieurs percées importantes, sur la fabrication reproductible de sources de photons uniques en 2008 et sur leur efficacité et pureté quantique exceptionnelle en 2016. C'est alors qu'elle a cofondé l'aventure Quandela, avec pour premier objectif de commercialiser ces sources de lumière quantique. De son côté, Jean a rejoint SYSTRAN, société leader française de traduction automatique, au sein de laquelle il a gravi les échelons pour en prendre la direction scientifique en 2010 et en devenir le dirigeant en 2015. Il a, au fil des années, transformé la société et sa technologie en introduisant notamment les techniques d'intelligence artificielle et en créant OpenNMT. Avec l'accélération des technologies quantiques, Quandela décide en 2020 de se lancer dans la création d'un ordinateur quantique. Un an plus tard, Jean décide de rejoindre l'aventure du développement de l'ordinateur quantique et apporte à Quandela toute son expertise de développement logiciel et commercialisation de produits industriels – il lance dès son arrivée Perceval, un logiciel « open-source » de simulation de circuits photoniques.

Quel regard portez-vous sur l'évolution du secteur du HPC et du quantique ?
Aujourd'hui, le quantique est une réalité qui dépasse l'étape de démonstration en laboratoire. Le récent Prix Nobel attribué notamment à Alain Aspect en est la plus récente illustration. Le monde du quantique se mobilise actuellement sur la fabrication d'ordinateurs quantiques, une étape stratégique qui nécessite la combinaison de l'expertise d'ingénieurs, de physiciens, d'informaticiens et de théoriciens. Les premières applications commencent à émerger et le potentiel d'accélération du quantique est de plus en plus mesurable. D'autre part, l'approche classique du calcul atteint ses limites, notamment en termes de consommation énergétique. Il est évident qu'il n'est plus possible d'augmenter les puissances de calcul de manière classique. Forts de ces constats, le quantique offre une alternative intéressante avec un ordinateur quantique qui a vocation à résoudre efficacement certains problèmes réputés difficiles.
Nous sommes à une étape charnière et il est essentiel aujourd'hui de combiner le monde du HPC et celui du quantique en combinant la maturité du premier à la puissance du second.

Dans ce cadre, comment vous positionnez-vous ?
Quandela a vu le jour en 2017. C'est une start-up issue du CNRS et dont les travaux sont basés sur une technologie unique qui permet de produire des qubits quantiques photoniques de la manière la plus efficace

existante aussi bien sur le plan académique qu'industriel. Au départ, Quandela s'est développée comme une société de production de hardware pour les qubits photoniques. Depuis deux ans, elle a fait évoluer son positionnement et mobilise ses moyens et ressources au service de la conception et de la fabrication de machines de calcul quantique. Les premiers processeurs quantiques manipulant jusqu'à 6 qubits sont déjà disponibles sur le cloud.
Actuellement, Quandela compte une soixantaine de collaborateurs. Elle est « full stack » et couvre ingénieurs et chercheurs en semi-conducteurs, optique, informatique, algorithmique, électronique, toutes les compétences essentielles pour rendre cette technologie accessibles sur le cloud.
Nous opérons, par ailleurs, sur un marché émergent où il faut, en plus, réaliser un travail de vulgarisation et de pédagogie auprès des acteurs du calcul haute performance classique afin de les amener vers ces nouvelles technologies.

Quelles sont les principales caractéristiques et fonctionnalités de votre plateforme de calcul quantique ?
Notre plateforme est basée sur une approche photonique, qui a, d'ailleurs, été mise en lumière par le dernier Prix Nobel en date. Le support de l'information quantique est porté par le photon et le calcul quantique s'opère au travers de l'intrication de ces photons. C'est le cœur même de notre technologie. Aujourd'hui, nos produits sont commercialisés dans le monde entier et utilisés par des clients pour faire leurs calculs quantiques. Pour ce faire, nous allions le meilleur de la technologie des semi-conducteurs, de la physique atomique et de l'optique quantique avec les protocoles de calcul que nous avons développés en interne.
Notre plateforme a aussi la particularité d'être modulaire ce qui va permettre des mises à jour continuelles des performances des calculateurs. En effet, au fil des évolutions et des avancées technologiques, nos clients pourront en bénéficier sans avoir à changer complètement de machines et ainsi pour des investissements complémentaires réduits.
Travailler avec des photons permet enfin de multiplier la puissance des ordinateurs en connectant plusieurs ordinateurs quantiques par fibre optique pour faire du calcul de manière distribuée.

À quels problématiques et besoins permet-elle de répondre ?
Une première application qui repose sur deux qubits seulement est la génération de nombres aléatoires certifiée quantiquement. Il s'agit d'un usage généralement utilisé pour des questions de sécurité ou de cryptographie. Pour ces cas d'usages, Quandela propose Entropy, une solution qui permet de faire de la génération de nombres aléatoires certifiée par les lois du quantique. L'approche photonique diffère également de l'approche « gate-based » suivie par les autres technologies quantiques et est particulièrement adaptée au développement du machine learning quantique de par la taille de l'espace considéré (appelé l'espace de Fock).

Quels sont les enjeux auxquels vous êtes confrontés aujourd'hui ?
Le premier enjeu est technologique. Nous devons encore fournir un important travail d'optimisation au niveau des processus de fabrication et d'intégration de manière à réduire les imperfections et les pertes de photons qui sont le support de l'information quantique. Le second enjeu est humain. Le secteur doit attirer plus de talents avec des profils divers.
En parallèle, il est aussi important de développer les formations pour former ces compétences et attirer des profils variés qui ne se prédestinaient pas forcément au monde du quantique. Enfin, il y a actuellement une course aux investissements entre les différents pays pour développer l'ordinateur quantique. Pour la France, plus particulièrement, c'est aussi un enjeu de souveraineté technologique.

Comment voyez-vous votre entreprise évoluer au cours de la prochaine décennie ?
Dans la course à l'ordinateur quantique, Quandela a opté pour une démarche pragmatique qui s'appuie sur la mise en place de petits calculateurs avec des capacités qui ont vocation à augmenter progressivement et dans la durée. En parallèle, nous nous sommes positionnés sur une technologie unique basée sur les photons. Parce que notre ordinateur s'appuie sur une particule sans charge ni masse, par définition, il n'est pas exposé à la décohérence qui est la limitation à maintenir un état quantique des autres plateformes. Nous utilisons ainsi la particule physique la mieux adaptée ce qui offre à Quandela une avance, mais également de belles perspectives de développement pour la mise en réseau d'ordinateurs quantiques au sein de HPC.

EN BREF

Quandela est une entreprise experte dans la fabrication de composants pour la photonique quantique. La start-up a été fondée en 2017 par Pascale Senellart, directrice de recherche au centre de nanosciences et de nanotechnologies du CNRS et de l'Université Paris-Saclay, Valérian Giesz, ingénieur et docteur en optique quantique, et Niccolo Somaschi, docteur en nanotechnologies semi-conductrices. La pépite technologique française se concentre sur le développement d'un ordinateur quantique photonique. Allant dans ce sens, elle a dévoilé dans le courant de l'année 2020 Prometheus, le premier générateur de qubits photoniques commercial au monde et arrive sur le cloud et commercialisé en 2022 et MOSAIQ, le premier ordinateur photonique de la taille d'une baie informatique.

INGÉNIEURS, INGÉNIEURES : osez l'industrie !

Nathalie Messer, directrice du Centre National d'Équipements de Production d'Électricité d'EDF, nous présente ce centre d'ingénierie nucléaire qu'elle dirige et ses principaux métiers. Elle revient également, de manière plus large, sur les perspectives que l'ingénierie et l'industrie peuvent offrir aux ingénieurs.

Nathalie Messer

Le Centre National d'Équipements de Production d'Électricité (CNEPE) d'EDF est un centre d'ingénierie. Quels sont son périmètre d'action et son cœur de métier ?

Le CNEPE est le centre d'ingénierie nucléaire d'EDF qui travaille sur les centrales nucléaires existantes et en construction. Au cœur de son activité, on retrouve l'ingénierie, c'est-à-dire l'ensemble des fonctions, de la conception aux études, jusqu'à la fabrication et la mise en service d'une installation industrielle en passant par les achats, la fabrication d'équipements… L'ingénierie est une étape clé dans de nombreux domaines. Elle est nécessaire, par exemple, à la construction d'un pont, la fabrication d'une pompe, d'une voiture, ou encore d'un avion… Dans l'ingénierie nucléaire, notre attention et notre intervention portent sur les centrales nucléaires de production d'électricité. Notre périmètre d'action en couvre toutes les dimensions, en dehors de ce qu'on appelle l'îlot nucléaire dont l'objectif est de produire de la vapeur à partir de la fission nucléaire. Nous sommes ainsi en charge de la salle des machines où se trouve la turbine de production d'électricité à partir de la vapeur produite par l'îlot nucléaire ; de la transformation de l'électricité et de son envoi sur le réseau ; de la source froide à savoir les installations qui garantissent le refroidissement des différents systèmes ; des différents bâtiments annexes ; des systèmes de protection d'accès des installations…

Sur les réacteurs existants, dans le cadre du programme « grand carénage » qui a vocation à prolonger la durée d'exploitation des réacteurs, nous travaillons sur les modifications à apporter et sur leur déploiement dans les centrales. En parallèle, nous sommes mobilisés sur toutes les phases de développement de nouveaux réacteurs, de la phase de conception sur des projets tels que NUWARD, le projet SMR développé par EDF en partenariat avec Naval Group, TechnicAtome et le CEA ; à la phase de construction sur des projets tels Hinkley Point au Royaume-Uni, et le futur réacteur EPR2, pour lequel nous produisons les plans de construction nécessaires aux chantiers ; ou encore le développement des procédures et de la réalisation d'essais avant la mise en service des installations telles que l'EPR de Flamanville … Nous couvrons ainsi tous les champs de vie des réacteurs en construction et en exploitation.

Aujourd'hui, le CNEPE regroupe mille cinq cent personnes et une centaine d'alternants à Tours et sur 8 centrales nucléaires. Le Centre s'appuie sur une organisation matricielle avec des équipes projets, études, et réalisation, ainsi que des fonctions support.

Actuellement, la filière nucléaire est au cœur des enjeux énergétiques actuels et de la lutte contre le réchauffement climatique. Comment contribuez-vous à cet effort ?

En effet ! La place stratégique du nucléaire n'est plus à démontrer. La filière nucléaire contribue à renforcer la souveraineté nationale en matière d'approvisionnement énergétique, un sujet que la guerre en Ukraine a remis sur le devant de la scène. Dans le contexte actuel, il est important de ne pas

opposer le nucléaire, les énergies renouvelables et la sobriété énergétique : pour lutter contre le réchauffement climatique, nous avons besoin de toutes les formes d'énergies et de tous les leviers d'économie d'énergie ! L'ambition de neutralité carbone en 2050 a poussé le gouvernement à adapter sa feuille de route en matière de nucléaire, feuille de route renforcée par les derniers événements géopolitiques et leurs impacts sur la situation énergétique en France. Lors de son discours à Belfort, le Président de la République, Emmanuel Macron a réaffirmé que, dans la lutte contre le réchauffement climatique, l'électrification des usages est essentielle, moyennant une production d'électricité bas carbone.

L'augmentation des besoins en électricité nécessite la construction de nouveaux moyens de production. Le développement des énergies renouvelables ne sera toutefois pas suffisant. Il doit se poursuivre, en parallèle du développement du nucléaire. En effet, le nucléaire permet de produire une électricité bas carbone. Grâce à son parc nucléaire et à ses centrales hydrauliques, la France dispose d'un contexte assez favorable sur ce point, en comparaison à d'autres pays comme l'Allemagne.

Concernant la production électrique d'origine nucléaire, le président indique trois points essentiels nous concernant : le fait que dorénavant les fermetures de centrales ne doivent être motivées que par des raisons de sécurité, la volonté de lancer un programme national de construction de six réacteurs de type EPR2 avant la demande d'étudier la possibilité d'en construire huit de plus. Tous ces projets impliquent un important travail d'ingénierie à notre niveau.

Dans cette continuité, quelles sont les opportunités de carrière qu'EDF et son centre d'ingénierie nucléaire, le CNEPE, peuvent offrir à des ingénieurs ?

EDF, le CNEPE tout comme la filière nucléaire dans son ensemble ont de très belles carrières à offrir aux jeunes femmes et aux jeunes hommes qui nous rejoindront. En effet, sur les projets que j'ai précédemment mentionnés, nous ne sommes pas seuls. Nous travaillons avec nos partenaires et nos fournisseurs (chaudronnerie, matériel, tuyauterie, bureaux d'études...). Sur la prochaine décennie, en prenant en compte l'augmentation de la charge de travail et des départs à la retraite, nous aurons besoins de recruter plus de 10 % des ingénieurs diplômés en France chaque année sur un marché global de l'emploi très compétitif. Les ingénieurs peuvent accéder à une large palette de métiers : génie civil, électricité, informatique... Et je vous assure, tous les métiers d'ingénieurs mènent au nucléaire.

Au-delà, c'est toute l'industrie qui recrute massivement. L'industrie est aujourd'hui à la croisée de très forts enjeux climatiques et environnementaux, mais aussi économiques alors qu'on parle de plus en plus de relocalisation et de souveraineté énergétique. Ce sont des métiers qui ont du sens, mais qui peinent à recruter à cause de la persistance de nombreux clichés. L'industrie s'est considérablement modernisée au cours des dernières décennies. Elle est beaucoup plus digitale et a adopté les nouvelles postures managériales qu'on retrouve dans les autres secteurs d'activité.

J'aimerais aussi insister sur le fait qu'en tant qu'ingénieur, il est possible de faire de la technique sans forcément passer par la R&D. Il y a de très belles choses à réaliser dans l'ingénierie, un domaine concret avec de larges champs d'application.

Pour un ingénieur, opter pour l'ingénierie est une très belle manière de se lancer dans la vie professionnelle et d'avoir une carrière riche et passionnante. Il est réducteur de penser que l'ingénierie et la technique sont réservées aux ingénieurs qui souhaitent devenir des experts. C'est la voie la plus adaptée pour évoluer également vers la filière projet, chantier et/ou managériale. Enfin, avoir une expérience dans le conseil ne favorise pas l'accès à un poste de dirigeant. Au sein d'EDF, mais aussi chez nos partenaires et nos fournisseurs, une très large majorité des dirigeants ont eu un parcours technique. Sur un plan plus personnel, c'est mon cas. J'ai démarré sur des fonctions techniques qui m'ont permis d'acquérir une connaissance métier sur laquelle je m'appuie, aujourd'hui, au quotidien dans le cadre de ma mission de dirigeante.

Quel message pourriez-vous adresser à nos lecteurs ?

Osez l'industrie et vous aurez de très belles carrières, porteuses de sens !

« NOUVELLES TECHNOLOGIES : la diversité à cœur ouvert »

Depuis sa sortie des Mines de Paris, *Gabrielle Bugat* a su relever des défis majeurs à l'international, dans le domaine de la sécurité digitale. Aujourd'hui, elle gère l'activité cartes et paiements digitaux de *Giesecke+Devrient (G+D)*. Retour sur son parcours, et sur sa vision de la diversité.

Gabrielle Bugat (promotion 98)
Directrice exécutive Monde de l'activité paiement, Giesecke + Devrient

Quelles ont été les étapes les plus structurantes de votre parcours ?

En 21 ans de carrière, je n'ai eu que deux employeurs : d'abord embauchée par Schlumberger, dans la division carte à puce devenue indépendante en 2004 puis cotée (Gemalto), j'ai ensuite rejoint G+D en 2017. La culture Schlumberger est une référence en matière de management et de diversité, permettant à tout élément prometteur de rapidement gagner en expérience. Ainsi, dès 26 ans, j'ai obtenu mes premiers galons de manager, comme directrice technique en Amérique latine. Pour répondre à la forte demande du marché télécom, j'ai recruté nombre de jeunes ingénieurs, tout juste sortis des universités du Mexique, du Brésil, d'Argentine ou de Colombie. J'ai appris à composer avec leur créativité, puis à les accompagner dans leurs choix de carrière. De retour en France, j'ai basculé vers une responsabilité P&L ("profit & loss"), avec la gestion du business « banque » sur l'Europe de l'ouest et l'Afrique, puis celle, mondiale, des services bancaires. Que nos pratiques en matière de paiement sont différentes, de la Chine aux Etats-Unis, du Nigéria à la Suède ! Ce constat m'a amenée à privilégier des équipes produits très diversifiées et multisites.

En 2017, j'ai rejoint G+D, acteur majeur du paiement tout-terrain : tous pays et tous formats, du billet à la carte, du mobile à la monnaie digitale. Cette paytech de 170 ans est une entreprise familiale allemande, spécialiste des technologies de la sécurité, diversifiée dans la connectivité, les identités et les infrastructures digitales.

J´y dirige aujourd'hui près de 4 000 collaborateurs, en poste dans une vingtaine de pays : à notre siège munichois où se prennent les décisions stratégiques d'investissement, sur nos nombreux sites industriels, dans nos centres de R&D, et au plus près de nos clients pour les commerciaux et les équipes d'intégration projet. Je suis également membre du Comex de G+D.

Aujourd'hui, quelle est votre feuille de route ? Quels sont les principaux sujets qui vous mobilisent dans le cadre de vos fonctions ?

Mon secteur d'activité est d'un incroyable intérêt ! On y côtoie banques pluri-centenaires, fintechs et géants mondiaux. On réinvente et on innove, tant dans les technologies que dans l´expérience utilisateur.

Dans ce contexte, G+D doit rester un partenaire de confiance incontournable pour sécuriser les paiements : l'axe principal de notre feuille de route est le développement d'une offre adaptée aux nouveaux usages. En voici un aperçu.

Authentification et identification : la relation à la banque a bien changé, puisque 2 milliards de clients accèdent aux services bancaires en ligne et attendent une relation personnalisée à distance.

Protection des transactions : avec l'essor du e-commerce, l'infrastructure de paiement par carte se renforce, grâce à la tokenisation et aux solutions 3DS ("3 Domain Secure"), protocoles de sécurité visant à prévenir la fraude dans les transactions en ligne.

Eco-responsabilité : il faut plus de développement durable, avec des cartes en plastique recyclé, en plastique des océans, des offres dématérialisées et une transparence carbone.

Lien émotionnel : 200 millions de consommateurs ont recours aux néo-banques sans agence physique, pour lesquelles la carte est devenu un marqueur essentiel et qui ont ouvert la voie à plus de design – cartes en métal, en céramique, avec effet 3D…

Phygital : physique ou digital, en magasin ou en ligne, avec une carte ou un mobile - ce n'est pas l´un ou l'autre, mais l'un et l'autre. Tout combiner est un défi d'intégration de système.

G+D propose ces produits, ces solutions et ces projets au secteur bancaire, fournissant un service de proximité qui s'appuie sur un maillage industriel global.

Au quotidien, nous sommes confrontés aux

pénuries (semi-conducteurs, papier…), aux vagues de Covid-19, à l'explosion des coûts, aux contraintes géopolitiques qui modifient nos chaînes d'approvisionnement, à la difficulté à pourvoir nos postes col bleu et col blanc. Nous gérons ces crises tout en construisant l'avenir, et j'encourage mes équipes à toujours plus de rapidité d'adaptation, de persévérance à se transformer en profondeur et d'humilité technologique.

Quel regard portez-vous sur la mixité dans votre secteur d'activité ?

Nos métiers sont très ouverts à la diversité – les banques ont d'ailleurs été précurseurs quant à la féminisation de leurs équipes. Nul doute que chacune peut s'épanouir professionnellement dans la tech. Regardez la variété des sujets qui m'occupent : logiciel, matériau, usine, management, il y en a pour tous les goûts et pour toutes les carrières. Au passage, quand tout évolue vite, la formation d'ingénieur généraliste à la française est une grande force, et une chance.

Pour continuer à innover de façon pertinente et efficace, je suis persuadée que diversité et intelligence collective sont nos meilleurs atouts : notre proposition est plus forte quand des équipes mixtes en genres, nationalités ou expériences collaborent dans une organisation fluide qui favorise les échanges et permet à chacun d'apporter sa touche personnelle.

Nous accueillons les ingénieures à bras ouverts. Étant à la croisée entre informatique et industrie, sur des métiers techniques, nous sommes confrontés aux problématiques bien connues des écoles d'ingénieurs : la difficulté à attirer les femmes. Continuons à déployer des efforts pour féminiser ces filières !

Comment les sujets de mixité, diversité et inclusion sont-ils appréhendés dans votre entreprise ?

La diversité est une ambition affichée de G+D, traduite en objectifs et en mesures précises. Aujourd'hui nous comptons plus de 70 nationalités dans nos effectifs, à tous les niveaux de l'organisation - par exemple 7 dans ma première ligne. Un quart de nos managers sont des femmes, y compris sur des postes techniques, comme dans mes équipes : directrice projet Amériques, patronne R&D Asie ou cheffe monde de l´offre matériaux.

Nos programmes de développement de talents font ainsi la place belle aux femmes, aux internationaux et… aux jeunes.

En effet, la question de l'attractivité du secteur pour les jeunes générations et la capacité à attirer, mais également à fidéliser les talents de demain, se pose…

La diversité générationnelle, pour un leader de la tech, est indispensable pour réinventer outils et process et pour répondre aux nouvelles demandes, comme celles de payer des « skins dans le metaverse avec son avatar » ou de stocker des NFT (non-fungible token) sur support physique. Les nouvelles générations nous surprennent dans leur rapport au travail et à l'entreprise qui les emploie. Alors nous développons les possibilités de travail hybride, entre bureau et domicile. Nous permettons une rotation plus rapide entre deux missions techniques. Nous encourageons la mobilité fonctionnelle ou géographique, faisant confiance à la capacité d'apprentissage agile de nos collaborateurs. Nous présentons enfin une attention authentique à un modèle de développement équilibré, étant une entreprise familiale depuis 7 générations.

Et, pour conclure, un mot à adresser à nos lecteurs et lectrices ?

Je suis souvent amenée à témoigner qu'il est possible pour une femme de réussir une carrière internationale, et de s'épanouir sur le plan personnel – je suis mariée, j'ai deux enfants. J'assume avec un grand sourire d'être un « role-model ». Aussi conclurai-je simplement avec ce proverbe japonais : pour traverser la rivière, tu dois te mouiller ou construire un pont.

DES MÉTHODOLOGIES ET DES EXPERTISES AVÉRÉES au service de toutes les entreprises

Benoît Romac, CEO de Porsche Consulting France, nous présente ce cabinet de conseil de direction générale au positionnement atypique. Dans cet interview, il revient sur la création du cabinet, ses principaux leviers de différenciation et les opportunités de carrière qu'il peut offrir à des ingénieurs.

Benoît Romac

Porsche Consulting a vu le jour dans les années 90 pour accompagner la transformation du groupe Porsche. Depuis, le cabinet s'est développé. Pouvez-vous nous en dire plus sur votre évolution ?

En effet, nous avons été créés il y a 28 ans à l'époque où Porsche était en situation de quasi-faillite, afin d'accélérer le redressement et la transformation du constructeur.

Aujourd'hui, Porsche est devenu le constructeur automobile le plus performant et le plus rentable au monde, et Porsche Consulting est fier d'avoir contribué à cette réussite. Nous réalisons un niveau de résultat très supérieur à la moyenne du secteur et enregistrons une croissance constante depuis les années 90.

À notre création, nos premiers clients étaient des fournisseurs de Porsche que nous avons accompagnés afin qu'ils deviennent plus performants et soient en capacité de fournir Porsche au bon niveau de qualité, délai et coût. Cette stratégie nous a permis de créer une activité de conseil professionnelle et équilibrée entre les besoins de notre maison-mère et ceux de nos clients externes. Aujourd'hui, Porsche Consulting ce sont 800 personnes dans le monde, avec une présence en Europe (Allemagne, Italie et France), aux États-Unis, au Brésil et en Chine. Le bureau français a été créé en 2020. Nous sommes aujourd'hui 25 avec d'ambitieux objectifs de croissance.

Aujourd'hui, dans le monde du conseil, quel est votre positionnement et quelles sont vos expertises ?

Nous sommes organisés en cinq secteurs :

- Mobility qui regroupe les secteurs automobile, aéronautique, transport (ferroviaire, logistique, naval...), spatial et défense ;
- Industrial Goods qui couvre les industries de process : construction, chimie, sidérurgie, ingénierie ;
- Life Science qui comprend l'industrie pharmaceutique et les biotechs ;
- Consumer & Retail qui regroupe les biens de consommation, l'agro-alimentaire et la grande distribution ;
- Et enfin, Services qui comprend l'énergie et les services financiers.

Nous nous positionnons comme un cabinet de conseil de direction générale qui accompagne ses clients dans le cadre de leurs transformations stratégiques pour être plus innovants, plus performants opérationnellement ou financièrement, être plus agiles dans des situations de « ramp-up », ou encore s'adapter à des situations de baisse de demande ou de pénurie d'approvisionnements. Nos clients sont principalement des entreprises industrielles ou encore des fonds de Private Equity que nous accompagnons afin de définir et déployer des plans de création de valeur.

Dans ce cadre, notre proposition de valeur, qui est aussi notre facteur de différenciation dans

"Notre proposition de valeur qui est aussi notre facteur de différenciation dans le marché du conseil est notre capacité à mettre à disposition de nos clients externes les savoir-faire, les compétences et les méthodologies que nous avons développés au sein du groupe Porsche afin de l'aider à se redresser et à devenir une entreprise leader dans son marché."

le marché du conseil, est notre capacité à mettre à disposition de nos clients externes les savoir-faire, les compétences et les méthodologies que nous avons développés au sein du groupe Porsche, afin de les aider à se redresser et à devenir des entreprises leader dans leurs marchés. Nous avons la capacité de montrer concrètement à nos clients externes l'ensemble des innovations et des réalisations que nous avons mises en œuvre chez Porsche.

Autour de quels besoins êtes-vous sollicités ? Pouvez-vous nous donner des exemples de missions sur lesquelles vous êtes amenés à intervenir ?

Nous intervenons dans le cadre de projets de transformation stratégique. Par exemple, nous accompagnons un grand équipementier mondial de l'automobile dans la transformation et la digitalisation de tous ses processus de logistique interne, afin de réaliser un saut majeur de productivité. Dans le spatial, pour un constructeur de satellites, nous avons transformé les opérations afin de diviser les coûts de non-qualité par deux et de réduire les temps de cycle. Dans l'aéronautique, nous sommes intervenus dans le cadre d'un programme de « design to value » afin d'améliorer la compétitivité des produits. Nous sommes aussi intervenus dans le cadre du redressement d'un acteur industriel racheté par un fonds d'investissement afin d'améliorer la performance des usines de production. Nous sommes également en train de construire une joint-venture entre un acteur institutionnel et une licorne technologique dans le cadre de la création d'une activité de Robotaxi (taxis autonomes).

Sur ce marché très concurrentiel du conseil, quels sont vos leviers de différenciation ?

Comme je l'ai mentionné précédemment, nous apportons les bonnes pratiques et les méthodologies éprouvées au sein du groupe Porsche. Ensuite, nous sommes connus pour générer de l'impact rapide, visible et dimensionnant. Un projet Porsche Consulting est un projet qui va vite et qui délivre de la valeur rapidement. De plus, nous tenons absolument à ce que les transformations que nous réalisons pour nos clients soient pérennes et durables. Pour ce faire, nous menons nos projets de manière totalement intégrée avec les équipes de nos clients. Ensemble, nous définissons la stratégie et élaborons le plan d'action que nous déployons conjointement sur le terrain. Cela permet de transmettre à nos clients les compétences et savoir-faire dont ils vont avoir besoin pour reprendre totalement la main une fois que nous partons. Et ce partenariat s'établit à tous les niveaux de l'entreprise : aux opérationnels, nous transmettons les compétences et savoir-faire, et à la direction générale, nous apportons la clarté nécessaire pour prendre les décisions qui permettront de définir et mettre en œuvre la stratégie.

Aujourd'hui, notre maison-mère Porsche prépare l'écomobilité de demain et repense complètement son business model : les technologies embarquées dans nos véhicules, la stratégie industrielle et d'intégration verticale, le développement de nouvelles compétences comme le software, les nouveaux business models de services de mobilité… Nous repensons également notre modèle de distribution pour un meilleur équilibre entre les canaux physiques et digitaux. Toutes ces transformations intéressent de nombreuses industries, au-delà du secteur automobile et, in fine, sont des thématiques sur lesquelles Porsche Consulting a développé une expertise différenciante

Enfin, nous invitons régulièrement nos clients à venir visiter nos démonstrateurs à l'échelle, par exemple nos centres de R&D ou nos usines de production, afin de pouvoir apprécier et se rendre compte de ce que nous avons mis en place pour notre maison-mère, mais aussi pour pouvoir échanger avec leurs pairs. Cette transmission du savoir prend chez Porsche Consulting une dimension inédite et est véritablement créatrice de valeur pour nos clients.

Quelles sont les perspectives de carrière que vous pouvez offrir à des ingénieurs ?

En France, nous sommes 25 personnes. Notre objectif est de doubler de taille sur les deux prochaines années. Nous sommes présents en France dans les cinq secteurs d'activité de Porsche Consulting. Pour accompagner notre croissance, nous recherchons des ingénieurs qui ont envie de générer de l'impact sur leurs missions, qui sont en capacité de réfléchir stratégiquement mais aussi agir avec pragmatisme et générer de l'enthousiasme pour leurs clients. Les ingénieurs juniors et seniors qui nous rejoignent trouvent au sein de Porsche Consulting une équipe dynamique et passionnée. C'est aussi pour eux l'opportunité d'apprendre toutes ces méthodologies qui ont été développées dans le Groupe Porsche.

Pour un jeune ingénieur, c'est la possibilité d'être exposé à un large panel d'industries et d'enjeux de transformation, avant d'envisager une spécialisation dans un secteur donné. Au niveau des profils expérimentés, nous recrutons aussi bien des personnes issues du conseil que du monde de l'industrie.

LA RAISON INAVOUÉE DE L'ÉCHEC de la transformation digitale

Dans le monde actuel, caractérisé par l'accélération de la volatilité de la main d'œuvre, la complexité technologique et les perturbations économiques, les organisations doivent avoir pour racines des flux d'information continus et axer leur fonctionnement sur la connaissance. D'un côté, il y a ceux qui apprennent vite, s'adaptent et prospèrent ; de l'autre, ceux qui n'apprennent pas assez vite, sont pénalisés et finissent déclassés. Dans ce contexte d'incertitude et d'accélération, les organisations doivent fluidifier les opérations et assurer la continuité et l'excellence de leurs activités en menant à bien la transformation.

Stefan Dragomir
CPTO, cofondateur d'Armtek

Bio express
Fort d'une expérience combinée dans des entreprises et des start-up, Stefan Dragomir s'intéresse à la collaboration, à la gestion du changement, à la diversité et au coaching, en associant une vaste expertise en matière de transformation à de solides compétences en gestion des parties prenantes et à un style collaboratif. Il peut facilement traduire la vision de l'entreprise en plans opérationnels clairs afin de garantir la réalisation efficace et rapide des objectifs organisationnels.

Peut-être êtes-vous un dirigeant qui a d'ores et déjà investi du temps, de l'argent et de sa crédibilité personnelle, dans la transformation digitale. Pourtant, un doute subsiste. Vous avez le sentiment que quelque chose ne va pas. Si vous constatez des succès anecdotiques, ils n'ont au fond que peu d'impact sur votre modèle d'organisation global et sur votre empreinte stratégique. Vous hésitez. Mais le temps, lui, continue de filer, avec son lot de bouleversements majeurs, affectant sans relâche les organisations, les industries, les sociétés et les vies personnelles.

Lorsqu'une révolution industrielle est en cours, les organisations se transforment ou meurent. La transformation digitale est la clef du succès face au paradigme de la quatrième révolution industrielle. Et pourtant, la transformation requise par cette révolution ne peut en aucun cas résulter d'une démarche d'innovation qui resterait inscrite au sein du cadre posé par le modèle actuel de l'organisation.

Pas moins de 70 % des politiques de transformation digitale échouent. La raison surprenante en est le manque de discipline.

La bataille pour prospérer au cœur de la quatrième révolution industrielle s'annonce acharnée, mais elle peut être gagnée. Le jeu en vaut la chandelle. L'enjeu n'est pas seulement de résister à la menace existentielle planant sur les organisations et leurs employés, mais de détenir le pouvoir de façonner les produits de demain, de renforcer l'estime que les employés et les consommateurs ont pour eux-même, d'élever les sociétés et de rendre le monde bien meilleur qu'au départ.

Dans son livre Exponential Organizations, Salim Ismail définit une organisation exponentielle comme celle dont l'impact sur le monde est sans commune mesure avec celui de ses pairs, grâce à l'usage de nouvelles techniques organisationnelles qui tirent parti des technologies exponentielles. Dans l'ère digitale que nous vivons, seules les organisations à caractéristique et mentalité exponentielles sont dans la meilleure position pour prospérer. C'est pourquoi, contrairement aux organisations traditionnelles axées sur le « commandement et le contrôle », les organisations exponentielles sont **digitales, basées sur l'information et guidées par la connaissance**. Là où les organisations traditionnelles sont stimulées et poussées à agir par la pénurie des ressources qu'elles sont en capacité de contrôler, les organisations exponentielles s'épanouissent dans l'abondance en exploitant un écosystème bien plus vaste. Les organisations traditionnelles évoluent de façon délibérée et planifiée. **Les organisations exponentielles sont flexibles, ajustables, agiles et font fi des barrières à l'entrée quand il s'agit de pénétrer une nouvelle industrie, quelle qu'elle soit, et elles connaissent alors une croissance fulgurante.**

Pour saisir le pouvoir de transformation émanant des technologies exponentielles, voici quelques exemples :

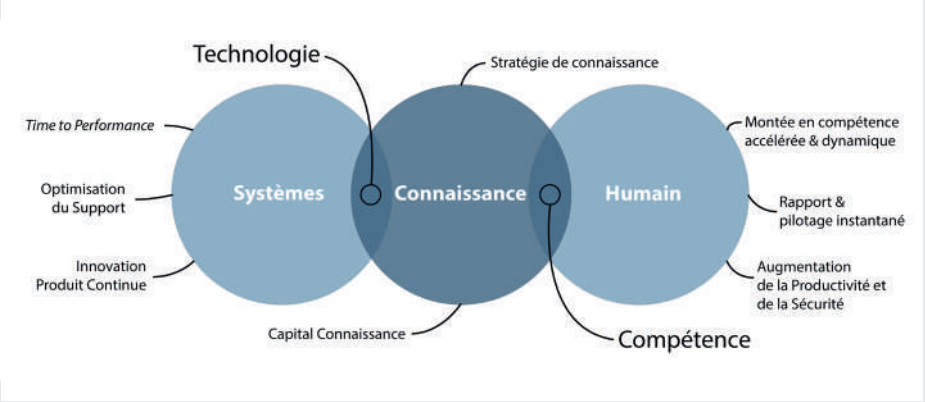
- La puissance de calcul disponible pour 1 000$ continue de croître de manière exponentielle. D'ici 2023, il sera possible d'acquérir la capacité de traitement d'un cerveau humain entier ! Compte tenu de la complexité du système cérébral humain, il s'agit d'une étape cruciale ;
- D'ici une vingtaine d'années, il sera possible d'obtenir la capacité de calcul de tous les cerveaux humains de la planète pour 1 000$. Imaginez un instant la façon dont le fonctionnement des organisations pourrait être impacté ;
- En mars 2018, IBM a dévoilé le plus petit ordinateur du monde, qui ne ferait qu'un millimètre et dont la fabrication coûterait quelques centimes. L'université du Michigan a répliqué en juin 2018, présentant sa version, qui ferait un dixième de cette taille ;
- La version actuelle de l'IA de Google, baptisée Alpha-Zero, a appris à jouer aux échecs en quatre heures et a battu le meilleur programme d'échecs du monde, Stockfish 8, par 100 à 0. Elle avait auparavant battu les meilleurs joueurs de Go du monde sous le nom d'AlphaGo.

Ces événements sont éminemment pertinents lorsque l'on cherche à imaginer quel pourrait être l'avenir des opérations des organisations. Imaginez l'avenir de votre organisation si vous pouviez acheter la capacité de tous les cerveaux humains du monde ? Ou comment changerait le fonctionnement d'une organisation si elle pouvait connecter et permettre des interactions sans erreur entre tous les fournisseurs, clients et parties prenantes à un coût incroyablement bas ?

Quelle clé pour atteindre l'excellence opérationnelle dans la nouvelle ère de la quatrième révolution industrielle ?

Le sujet est délicat. Les organisations doivent cesser de « faire » du numérique et doivent commencer à « être » numérique. Cet objectif d'« être » numérique est essentiel pour réaliser une transformation perpétuelle. Une organisation peut « faire » du numérique dans le cadre d'une transformation ponctuelle et incrémentale, mais pour atteindre un leadership permanent sur son marché, elle doit « être » numérique.

L'organisation a atteint le stade de l'« être » lorsque le numérique peut être considéré comme « ADN vivant » de son fonctionnement. Cet objectif ne peut être atteint qu'avec une approche holistique, c'est-à-dire en considérant les opérations dans leur intégrité, avec la technologie, la connaissance et la main-d'œuvre formant un seul système intégré. En effet, les problématiques essentielles ne peuvent être résolues en se concentrant sur une partie spécifique de l'organisation. Les problèmes complexes exigent souvent des solutions complexes. Et les ensembles travaillant en interaction au sein de systèmes génèrent une valeur supérieure à la somme des parties.



Pour faire de ce rêve une réalité, vous devez combattre le manque de discipline, en mettant en œuvre les méthodologies les plus avancées, soutenues par la technologie numérique. Une approche moderne qui vise à automatiser et à intégrer les processus dynamiques dans chaque secteur opérationnel, tout en assurant les flux informationnels adéquats, et en capitalisant la connaissance de façon intrinsèque, naturelle et automatique.

Cette méthodologie énonce 5 principes :

1. Le contenu opérationnel et les informations sont enracinés dans les processus et les cycles industriels ;
2. Tout le monde peut contribuer aux flux d'informations et à la capitalisation des connaissances ;
3. Tous les contenus sont dynamiques, centralisés et contrôlés par version ;
4. Les principes d'amélioration continue sont mis en œuvre au niveau de l'organisation grâce au feedback rapide des parties prenantes ;
5. L'information est trouvée et exploitable à tout moment et en tout lieu.

Pour créer une harmonie organisationnelle, et pour que les opérations travaillent à l'image d'une montre suisse, les processus, l'information et la connaissance doivent être unifiés et partagés au sein de l'organisation, à tous les niveaux. Ce faisant, les organisations alignent le monde des opérations avec les départements en charge de la performance et les leaders stratégiques, ce qui permet d'accélérer le travail, la communication et l'exactitude de la prise de décision.

En identifiant, en conservant et en développant votre capital de connaissances, vous atteindrez toujours la cible mouvante et resterez fidèle à votre trajectoire de connaissances. En fin de compte, l'organisation exponentielle est celle qui comblera naturellement l'écart entre ses capacités de connaissances actuelles et les capacités nécessaires pour atteindre ses objectifs stratégiques.

EN BREF

Armtek est la solution de collaboration opérationnelle pour les organisations exponentielles. Nous développons la plateforme logicielle holistique qui unifie, automatise et capitalise les flux d'information, les processus et la connaissance. Avec Armtek, les organisations augmentent l'efficience opérationnelle de plus de 100 % en révolutionnant la façon dont leurs équipes s'organisent, partagent l'information et la connaissance.

© Matthieu Sattler

DON DE CHALEUR :

l'énergie comme bien commun et objet de solidarité

PAR **MATTHIEU SATTLER** (X16) ET **LAURENT FOURNIÉ** (X99)
COFONDATEURS DE DON DE CHALEUR

Face à l'actuelle double problématique sociale et géopolitique de l'énergie, Matthieu Sattler (X16) et Laurent Fournié (X99) ont lancé Don de Chaleur, un concept original qui incite à économiser de l'énergie pour financer des actions de solidarité. Cette entreprise à mission conjugue respect de l'environnement, impact économique et action solidaire.

Qu'est-ce que Don de Chaleur ?
Matthieu Sattler et Laurent Fournié : Don de Chaleur, c'est une entreprise à mission qui veut embarquer un million de Français dès cet hiver pour participer à un défi original : soutenir des projets solidaires sans rien débourser, simplement en économisant de l'électricité. Vous connaissez les courses solidaires : vous courez, et chaque pas que vous faites permet de récolter des dons pour une association de votre choix. Le Don de Chaleur, c'est la même chose mais, au lieu de courir, il suffit de relever une série de défis pour économiser l'énergie. Plus les participants font d'économies, plus il y a d'actions solidaires financées. Concrètement, qui finance la cagnotte ? Nos sponsors, fournisseurs d'énergie et entreprises souhaitant encourager leurs salariés à baisser leur consommation d'énergie. Pour les participants, c'est totalement gratuit. Ils doivent simplement remporter des défis d'économie d'électricité.

Pourquoi organiser un défi solidaire cet hiver ?
MS & LF : Tout en économisant sur leur facture, les participants peuvent soutenir simultanément des actions de lutte contre la précarité énergétique ou encore de l'aide énergétique d'urgence au profit de l'Ukraine, portées par des associations telles qu'Emmaüs Solidarité,

Électriciens sans frontières ou de petits acteurs locaux. Cela nous semble essentiel d'associer aux efforts de sobriété cette dimension solidaire. Face à la crise, les précaires énergétiques sont les plus exposés : ils vivent dans des passoires thermiques à cause desquelles leur facture de chauffage explose, alors qu'ils ont déjà du mal à joindre les deux bouts en fin de mois. Cette crise énergétique nous rappelle que l'énergie est un bien commun : tout le monde en a besoin et il faut apprendre à la partager équitablement, tout particulièrement quand elle vient à manquer comme cet hiver.

« Venez comme vous êtes, chaque kWh a de l'impact »

MS & LF : Pour participer, il suffit de s'inscrire en ligne pour relier son compteur connecté Linky à l'application. En tenant compte de votre consommation de l'année passée et des conditions météorologiques, nous estimons une consommation de référence pour le mois en cours et nous la comparons chaque jour à votre consommation réelle. Nous calculons ainsi vos économies d'énergie au quotidien.

Comme chaque kilowattheure compte, même les petits gestes ont de l'impact ! On peut facilement atteindre 10 % d'économie en accomplissant quelques missions simples et conviviales. Les défis proposés s'adaptent à tous les niveaux : cela va du bon réglage du chauffe-eau (simple et efficace !) à des défis vestimentaires pour les plus aguerris, pour réduire la température de chauffage.

Et vous proposez aux entreprises de monter des équipes ?

MS & LF : De plus en plus de salariés attendent une mobilisation de la part de leur employeur vis-à-vis des enjeux environnementaux. De la même façon, les clients recherchent des marques toujours plus engagées. Nous proposons ainsi aux entreprises de monter des équipes avec leurs collaborateurs ou clients, afin de leur offrir un moyen concret de s'engager au profit de la planète et de la société.

Les entreprises choisissent un projet associatif, et ce dernier est financé lorsque l'objectif collectif d'économie d'énergie est atteint par leurs collaborateurs. C'est un bon moyen de renforcer la cohésion d'équipe et de s'engager de façon conviviale. C'est également une des mesures que l'entreprise peut mettre en avant dans son plan de sobriété : des statistiques sont produites sur les économies d'énergie réalisées et les dons générés.

Vous êtes tous les deux polytechniciens (à quelques années d'écart). La communauté vous a-t-elle aidés à monter le projet ?

MS & LF : Le réseau de Polytechnique nous a aidés au moment de nous lancer, c'est certain ! Dès que nous avons démarré, nous nous sommes entourés d'un conseil scientifique de façon à être conseillés et à asseoir la crédibilité du projet… C'était loin d'être un critère, mais il se trouve que trois des cinq membres du conseil scientifique sont polytechniciens. Nous avons aussi bénéficié d'un fort soutien de la part d'anciens séduits par le projet au moment de trouver des fonds d'amorçage. On vous rassure, dans notre équipe en revanche, il n'y a que nous deux !

© Thomas Poitau

↑ Laurent (à gauche) et Matthieu (à droite), fondateurs de Don de Chaleur.

"On peut facilement atteindre 10 % d'économie en accomplissant quelques missions simples et conviviales."

Comment vous est venue l'idée ?

MS : En mars dernier lorsque la crise énergétique est survenue à la suite de l'invasion de l'Ukraine, Laurent et moi avions chacun ses idées fixes. Moi, je parlais à tout le monde de réduire autant que possible sa consommation d'énergie pour arrêter de financer l'armée russe. Et je voyais que beaucoup de gens étaient prêts à changer un peu leurs habitudes dès lors qu'ils en comprenaient l'impact concret.

Laurent, lui, était très préoccupé par la crise sociale qu'il voyait arriver cet hiver face aux risques de pénurie et de black-out. Il était convaincu que les appels à moins consommer ne seraient acceptables que si l'effort était collectif et équitable socialement.

L'Europe allait être bouleversée par une crise énergétique. Il fallait que ce soit l'étincelle pour que la sobriété devienne une démarche collective, organisée et équitable. Et c'est à force d'en parler qu'est né le Don de Chaleur, ou l'idée de financer un projet associatif depuis son radiateur, sans verser un euro. Un geste concret, à la portée de tous, qui conjugue respect de l'environnement, impact économique et action solidaire.

Pour rejoindre l'aventure, inscrivez-vous sur https://www.dondechaleur.fr/

MANAGEMENT ET CULTURE NATIONALE

PAR **MICHEL MATHEU** (X72), INGÉNIEUR GÉNÉRAL DES MINES

Philippe d'Iribarne (X55), J.-P. Segal, S. Chevrier, A. Henry et G. Tréguer-Felten viennent de publier aux Presses des mines l'ouvrage intitulé : *Cultures et management international, un nouveau paradigme.* Cet ouvrage, qui mérite plus qu'une simple recension, met en perspective les aspects du management interculturel pour rendre plus fructueuses les négociations internationales.

Cher lecteur de *La Jaune et la Rouge* – tu permettras, j'espère, l'usage de la deuxième et de la première personne, s'agissant d'un ouvrage qui interpelle chacun de façon très directe ; précipite-toi pour te procurer ce livre ! Quelle que soit ton expérience avec l'étranger, interactions de touriste avec une bureaucratie, négociations avec des entreprises non françaises, animation de groupes de travail internationaux, fusions ou acquisitions, le livre, proposé

© greenbutterfly

par plusieurs auteurs qui ont travaillé en équipe pendant des années et fréquenté les territoires les plus divers, te sera utile : il va éveiller chez toi des souvenirs, éclairer des incompréhensions, préciser ta « francité » en partie inconsciente – et, si tu fais face à des perspectives de partenariats internationaux, t'aider à les mener au mieux.

Un ouvrage totalisant

Cultures et management international est un texte ambitieux, qui embrasse tous les aspects du management interculturel. Au premier abord, l'exposé paraît un peu sinueux, avec de nombreux allers-retours entre théorie et pratique, ainsi qu'entre pays localisés un peu partout sur la planète. Mais plus on avance, plus cette complexité paraît naturelle. On découvre vite que les auteurs brassent des données en quantité et qu'ils les mettent en perspective selon plusieurs angles. En fait l'ouvrage est multidimensionnel.

La première manière de le parcourir est de se mouvoir dans un tableau à double entrée : en lignes, des thèmes structurants du management comme le leadership, les processus de décision ou le dialogue social ; en colonnes, des pays. Naturellement, toutes les cases ne sont pas remplies. Les colonnes les plus pleines sont sans surprise la française et l'américaine, mais l'africaine est dense aussi, et de nombreuses cases asiatiques sont bien garnies.

> *"En France le compromis n'est pas valorisé."*

Concernant les lignes, une place particulière revient au management par objectifs (MBO), tant les tentatives des investisseurs et des bailleurs de fonds pour généraliser cet outil américain à tous les pays révèlent les difficultés soulevées par les écarts culturels. Chaque case est une étude de cas, échecs – souvent – ou réussites.

Dans un second temps les auteurs survolent le tableau en deux colonnes, pour en déduire une vision théorique des cultures nationales et de la façon dont elles s'accommodent des outils de management disponibles ou, au contraire, en entravent ou biaisent la mise en œuvre. Cher lecteur, la formation que tu as reçue garantit que les espaces complexes ne t'effrayent point et tu suivras sans peine les auteurs dans une quatrième dimension : faisant fond tant sur la théorie des cultures que sur l'expérience accumulée dans les cases, ils abordent la conception et l'exécution de démarches de changement adaptées. L'ouvrage pénètre comme avec une vrille la matière complexe qu'il étudie et offre pour finir des propositions concrètes, inspirées par les cas étudiés.

Lignes et colonnes

Dans un premier temps les auteurs explorent six aspects du management (des « lignes » du tableau, donc). Sans résumer toutes les thèses correspondantes, quelques coups de projecteur peuvent être utiles. Mais auparavant une observation sur les cultures nationales (les « colonnes ») est indispensable. On pourrait penser que le niveau national n'est pas forcément le plus pertinent. Cependant, comme tu sais, cher lecteur, si tu as pratiqué les livres de Philippe d'Iribarne, il y a une telle homogénéité dans les problèmes culturels rencontrés dans les entreprises les plus diverses du même pays, et une telle permanence des régularités nationales dans la durée, que ce niveau s'impose comme primordial.

S'agissant du leadership, premier exemple, le *manager* français est présumé encourager son subordonné à bien faire son métier, dont celui-ci maîtrise les savoir-faire, accorder une certaine confiance et donc ne pas suivre le travail de trop près, et diriger au nom de la raison, sans arbitraire aucun. Le chef se légitime par sa compétence technique, qu'attestent les diplômes. À l'opposé, le manager américain doit inciter chacun à donner le meilleur de lui-même dans un cadre formalisé, il peut et même doit suivre continûment le travail de ses collaborateurs et il incarne des valeurs collectives →

→ qui font de lui le garant de l'unité des équipes. Il se légitime par son charisme bien plus que par sa maîtrise technique.

Deuxième illustration, l'opposition entre modèles de prise de décision. En France le compromis n'est pas valorisé. Un choix négocié apparaît comme une cote mal taillée entre deux points de vue rationnels, le compromis est jugé « mou » par nature. Seule l'argumentation structurée emporte l'adhésion – d'où l'importance de l'expertise du leader – et par conséquent dans la discussion il s'agit de convaincre. Si le résultat déplaît à l'une des parties, elle ne se sentira pas tenue à une application rigoureuse. Aux Pays-Bas et en Europe du Nord, en revanche, le rôle du manager est de faire émerger le compromis qui est hautement valorisé et toujours respecté, car il préserve l'unité du groupe, valeur essentielle. En Afrique de l'Ouest la difficulté est encore ailleurs. Le problème est d'éviter des décisions suspectes de favoritisme à l'égard d'un subordonné. Il importe de créer un contexte procédural qui garantisse que, si une décision défavorise quelqu'un, c'est parce qu'elle ne pouvait pas être différente et non parce que le décideur a voulu nuire.

Prendre de la hauteur théorique

Les exemples qui précèdent sont parlants. Peut-être, ami lecteur français (si tu l'es), te remémoreras-tu à leur lecture des souvenirs personnels. Pour qui – je parle d'expérience (bruxelloise) – a animé des groupes multiculturels, inventer un style qui ne soit pas sa manière instinctive est une tâche délicate : je me rappelle avoir tenté consciemment de me « nord-européiser » et à la lecture de l'ouvrage j'ai compris que pour autant je traquais encore, peut-être trop, les contradictions dans les consensus. Bref, le chemin de crête est toujours un équilibre précaire et l'erreur arrive vite. C'est précisément des doutes ou des déconvenues des acteurs de terrain, qui bricolent à tâtons des solutions, que partent les auteurs pour échafauder leur théorie des cultures nationales, qui éclaire les exemples qui précèdent. Leur thèse centrale, simple et riche de conséquences, est que dans chacune existe une inquiétude structurante, presque une angoisse du chaos, que la « bonne » façon de faire entend conjurer.

En France la crainte centrale est celle du rapport servile : il n'est pas question de s'abaisser pour obtenir une faveur. On « rend service », mais on n'est pas « au service » de quelqu'un. Si la notion de métier, et les savoir-faire qui vont avec, sont aussi importants, c'est parce que précisément ils protègent de la servilité : c'est une éthique professionnelle et non le supérieur qui dictent les choix. *A contrario*, les contrôles trop étroits sont très mal acceptés.

Aux États-Unis ce qui est redouté est de perdre la maîtrise de son destin. La référence implicite y est la relation contractuelle entre deux partenaires : le salarié reste une sorte de propriétaire (de sa force de travail), comme à l'époque où il n'y avait pas de grande structure hiérarchique organisée ; en quelque sorte, il offre son travail sur un marché, selon des dispositions formalisées par écrit. Typiquement, une personne interrogée par les chercheurs décrit sa vision de la relation avec son supérieur par la formule : « Dites-moi ce que vous voulez et je vous le fournirai. » Les procédures formalisées et les contrôles sont donc bien acceptés.

En Afrique occidentale, on redoute l'avidité et l'intention de nuire des autres : soit on a affaire à un ami, à qui on est lié au-delà de la simple coexistence professionnelle, et la confiance va de soi ; soit on peut légitimement craindre d'être la cible de mesures hostiles, et elle est impossible. Chacun, en dehors des solidarités avec les proches, est présumé mû par ses intérêts et tout acte est suspect de porter des intentions cachées. On attend des outils et procédures qu'ils protègent des velléités de nuire et il y a donc avantage à ce que celles-ci soient précises.

Mieux (se) comprendre

Déjà il faut passer à la quatrième dimension : comment agir mieux dans un contexte de choc culturel, où inévitablement chacun interprète les processus non pas en fonction des références de celui qui les a créés et veut les mettre en œuvre, mais en fonction de ses propres références ? Les auteurs répondent : dans un premier temps, en évitant les incompréhensions. Et celles-ci sont possibles dans la communication la plus élémentaire, donc la plus inconsciente. Le premier exemple est particulièrement saisissant : dans les mots de la langue. Quelle langue ? Lecteur de *La Jaune et la Rouge*, si tu n'es pas anglo-saxon de naissance, sans doute t'exprimes-tu de façon fluide en *globish*, ce sabir d'inspiration anglaise employé dans les grandes entreprises et les organisations internationales, en le truffant de quelques gallicismes et avec un petit accent qui, paraît-il, contribue à notre pouvoir de séduction aux États-Unis. Il est moins probable, mais pas impossible naturellement, que tu maîtrises un anglais idiomatique. Eh bien, expliquent les auteurs, la communication en globish, c'est le malentendu. D'ailleurs on apprendra dans l'ouvrage que,

en globish académique, ce sabir s'appelle plutôt ELF (*English as a lingua franca*).
La première raison est simple : le vocabulaire commun aux participants d'une réunion est assez pauvre, donc les nuances passent mal. *A contrario*, quiconque n'a qu'un bon niveau en globish, même s'il dispose d'un socle solide de « vrai » anglais – et je parle à nouveau d'expérience –, est gagné par la démoralisation face à un Britannique ou un Américain qui ne gaspille aucune énergie à produire subtilités et jeux de mots dans le débat. La seconde raison est plus indirecte et relève de la notion de *faux ami*. Des notions centrales du management sont différemment comprises dans deux pays, à la fois parce que les significations ne coïncident pas parfaitement et parce qu'elles sont chargées de valeurs différentes : typiquement « contrôle » (perçu comme tatillon et dévalorisé en français) et « control » (une maîtrise rassurante en anglais).
Tout aussi troublants sont les malentendus qui portent sur la façon de se présenter soi-même ou de présenter son entreprise : la communication naturelle de l'un est perçue comme arrogante par l'autre, l'expression factuelle de l'un est violemment agressive pour l'autre.

Que faire et comment le faire ?

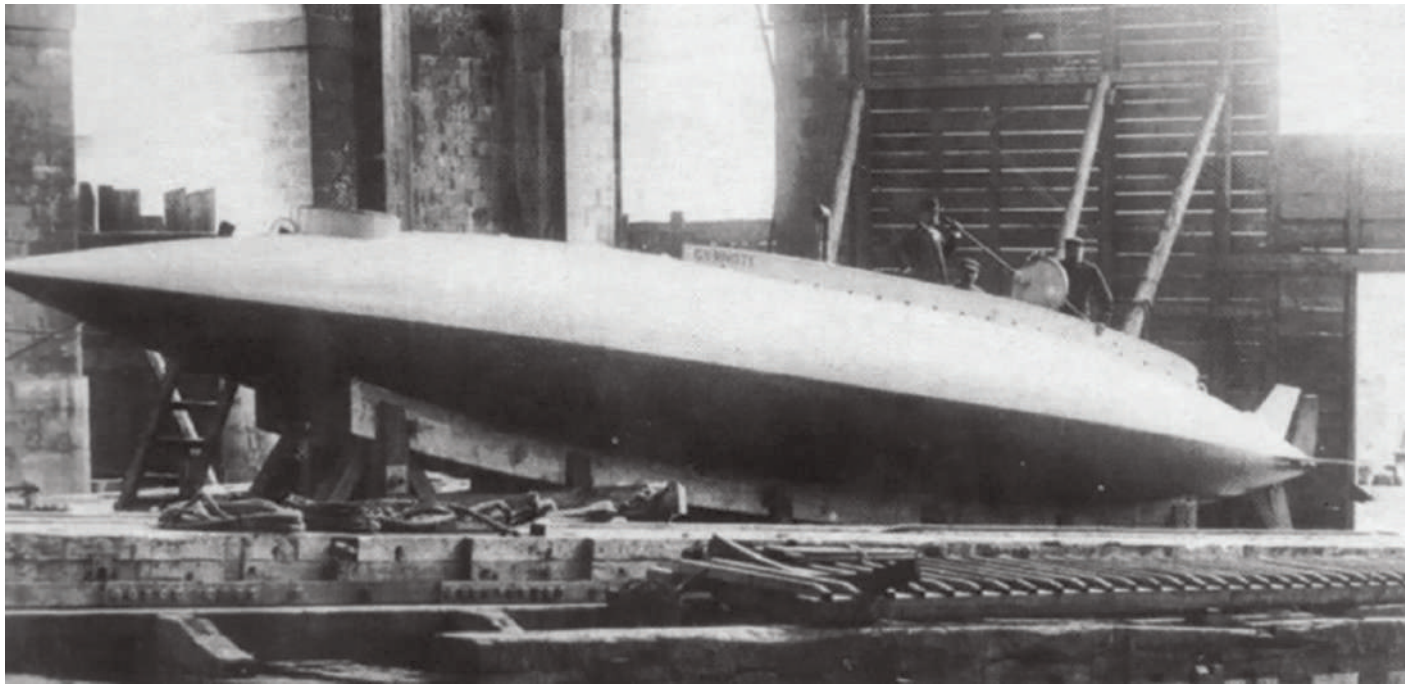
Naviguer dans cet océan d'incompréhensions est difficile mais, les cas de succès cités par les auteurs le montrent, n'est pas impossible pour autant. Il convient d'abord de faire une différence entre deux configurations. Soit deux cultures – ou un très petit nombre – sont en présence, soit on s'efforce de travailler dans un contexte très multinational.
Dans le second cas, les auteurs appellent à modérer l'ambition. Plutôt que d'aspirer à un apprentissage mutuel et à rendre chacun « polyglotte » culturellement, mieux vaut opter pour une structure décentralisée. Un projet multinational pourra avantageusement être découpé en lots et chacun de ceux-ci traité au niveau national, le travail multiculturel se limitant alors à l'assemblage des lots. Moins d'énergie sera consommée à aplanir les différends. Dans le premier cas, on peut prendre les problèmes à bras-le-corps : ainsi, l'incompréhension entre ceux qui pratiquent habituellement la décision consensuelle et ceux qui lui préfèrent un processus rationnel, ou bien, s'agissant de délégation, entre ceux qui souhaitent une définition très informelle des fonctions des subordonnés et ceux qui sont habitués à un détail extrême. Également, il faut souvent concilier des cultures où prédomine soit une éthique de la fidélité, soit une éthique de rationalité présumée garantir contre les passions. C'est clairement la seconde qui imprègne les outils dominants du management global.

> *"La méthode proposée par l'ouvrage est concrète et praticable."*

Une démarche d'apprentissage, dans la durée, est suggérée par les auteurs dans une situation à deux cultures : rendre les acteurs conscients de leurs présupposés, les aider à comprendre comment les procédures sont réinterprétées dans les cultures différentes de celle qui les a conçues, mettre en lumière les bonnes pratiques nationales. La chose requiert tant d'effort sur soi qu'un intervenant extérieur se révélera souvent utile. La réussite n'est pas garantie, mais les auteurs ont observé des cas où une réinterprétation raisonnable des outils qu'à l'origine on voulait importer tels quels, comme le *Total Quality Management* ou même le MBO, s'est soldée par un succès. Un certain volontariat pour s'engager dans les interactions et une coopération suffisamment durable paraissent requis pour que l'apprentissage aboutisse.

Où va-t-on ?

Faut-il conclure sur une note franchement optimiste ? Lecteur qui m'a suivi jusqu'ici, tu me permettras de me référer, exceptionnellement, à une culture régionale (supposée) et de donner une réponse de Normand. La perspective, après la pandémie, d'une multiplication des réunions à distance semble inquiétante : comment minimiser les malentendus lorsque le visage du partenaire est un timbre-poste sur un écran, que les conversations de couloir sont abolies ou que l'humour devient impossible à interpréter ? Ce futur peut faire apparaître la bouteille à moitié vide. Heureusement, la méthode proposée par l'ouvrage est concrète et praticable. Parmi les exemples analysés, les succès sont convaincants et semblent souvent réplicables, *mutatis mutandis*. Finissons par la bouteille à moitié pleine !



Le *Gymnote* (Q01).

UNE INVENTION POLYTECHNICIENNE : LE SOUS-MARIN MILITAIRE

PAR **JACQUES-ANDRÉ LESNARD**, TRÉSORIER DE L'ASSOCIATION VAUBAN

Sur plusieurs générations, des ingénieurs du Génie maritime issus de Polytechnique ont posé les bases du sous-marin, puis l'ont développé dans une perspective militaire. Il s'agit de Dupuis de Lôme, Zédé, Romazzotti et Laubeuf qui mirent au point le *Gymnote*, la *Sirène*, puis le torpilleur sous-marin qui abordera la Première Guerre mondiale avec une avance technologique internationale.

La difficulté d'une propulsion en milieu anaérobie et celle d'une direction en trois dimensions retardèrent la mise au point d'engins aptes à des missions militaires en France à la fin du XIXe siècle. Cela fut rendu possible par la réflexion et les efforts conjugués des ingénieurs du corps du Génie maritime issus de Polytechnique, dont quatre méritent d'être chronologiquement cités et dont trois dirigèrent d'ailleurs leur direction centrale, dite alors « du matériel », au sommet de leur carrière. Nous commencerons par la première génération des concepteurs.

Henri Dupuy de Lôme (X1835)

Dupuy de Lôme (Stanislas, Charles, Henri, Laurent) né en 1816 au château de Ploemeur (Morbihan), fils d'un capitaine de frégate, entre à l'X en 1835 puis opte pour le corps militaire du Génie maritime. Après un séjour en Angleterre, il publie en 1844 un *Mémoire sur la construction des bâtiments en fer*, vrai manifeste qui enthousiasme le futur empereur. Il devient « l'ingénieur chargé » (directeur de projet) pour le premier navire de guerre « de ligne », le *Napoléon*, lancé en 1850 : 90 canons et plus de 5 000 t propulsés par une hélice, autre nouveauté, qui lui permet de dépasser les 13 nœuds. Ce vaisseau s'illustrera lors de la guerre de Crimée, mais singulièrement comme… remorqueur de vaisseaux à voile pour traverser les Dardanelles et le Bosphore. La frégate, *Gloire*, lancée à Toulon en 1852 sur ses plans, tête d'une série de quatre, est la première frégate cuirassée (820 t pour un blindage de 12 cm jusqu'à 2 mètres sous la coque, compensés par la suppression d'une batterie de canons ramenée à 36 pièces, avec une vitesse de 13,5 nd aux essais, mais les sabords devaient être fermés par mer formée ! Le Génie maritime français se hisse au niveau anglais.

Une fin de carrière politique

Dès 1857, à 41 ans, Dupuy de Lôme devient directeur des constructions navales. Quatre ans plus tard il est parallèlement nommé conseiller d'État hors section, puis il entre à l'Académie de marine en 1866. Il prend une retraite anticipée à 53 ans en 1869, après douze ans comme directeur central, pour devenir aussitôt député du Morbihan dans l'ultime chambre du Second Empire. Parallèlement, il anime jusqu'à sa mort à la fois les Messageries maritimes et les Forges et Chantiers de la Méditerranée avec ses sites de La Ciotat et de La Seyne-sur-Mer. Sénateur inamovible en 1875, en succession du général Changarnier, il meurt en 1885.

Un innovateur performant

Élargissant son domaine de compétence professionnelle, il est le premier à mettre au point un « train blindé » avec des canons de marine sur rails, avant d'être chargé, à l'automne 1870 par le gouvernement provisoire, de mettre au point un aérostat dirigeable : la propulsion-orientation d'une hélice mue par les bras de quatre marins se relayant toutes les demi-heures reste inaboutie en 1872. Mais cette expérience permet la publication, la même année, d'analyses scientifiques de qualité avec la collaboration de Gustave Zédé. Elles le conduisent dans les dernières années de sa vie, par similitude de la physique du déplacement dans les trois dimensions, à concevoir l'idée d'un engin sous-marin, puis esquisse des planches de dessin, mais il décède avant la délicate mise au point qui sera effectuée par son successeur. Il est donc bien le grand-père des sous-marins français.

Les prémices des sous-marins

Par-delà la légende des soldats d'Alexandre le Grand devant Tyr (332 av. J.-C.) et les dessins de Léonard de Vinci ou autres Italiens de la Renaissance, on trouve dans les prémices de l'histoire des sous-marins en 1624 la commande de Charles Ier Stuart au Hollandais Cornelius Drebbel, pour traverser… la Tamise, ou dès 1690-1692 les essais de Denis Papin à Marburg (en Hesse, première université protestante, fondée dès 1527). L'idée d'un véritable submersible à visée militaire remonte raisonnablement à 1797, avec le *Nautilus* de Robert Fulton, mais il n'arrivera pas à vendre son concept, ni à l'Angleterre, ni à la France (cf. le roman d'Alexandra Rossi, *Le sous-marin de Bonaparte*). L'éperonnage, en 1864 au large de Charleston, d'un navire nordiste par le CSS (Confederate States Ship) *H.L. Hunley*, avant qu'il disparaisse corps et biens peu après, reste tout autant de l'ordre anecdotique.

Gustave Zédé (X1843)

Zédé (Gustave, Alexandre) est né à Paris le 15 février 1825 et sera le père des sous-marins. Il entre en 2e rang à Polytechnique dès 1843, suivant les traces de son propre père (X1809) : valeureux combattant en 1813-1814 en Allemagne, *Pierre-Amédée* Zédé avait développé sous la Restauration une belle carrière d'ingénieur du génie maritime, avec une prédilection pour les aspects forestiers, alors matière première des navires. Maître des requêtes en 1834, il deviendra préfet de l'Eure, de l'Aube, puis de la Loire. Nommé directeur des ports en 1848, il doit vite renoncer à sa fonction car malade, mais il est élevé au rang de commandeur de la Légion d'honneur en décembre 1848. Il revient au Génie maritime et termine sa carrière comme directeur des constructions navales à Cherbourg.

Vers le sous-marin !

Au sortir de l'école d'application, Gustave Zédé sert avec distinction à Brest pendant une dizaine d'années, avant d'être appelé à la direction centrale comme chef du premier bureau et très vite adoubé, en raison de son intelligence aiguë, par le directeur central Dupuy de Lôme, qui rapidement en fait son second. Il devient officier de la Légion d'honneur en 1866 et passe ingénieur de première classe en 1869. Il collabore étroitement avec Dupuy de Lôme devenu civil, sur les aérostats, en 1870-1872. Promu en 1877 directeur des constructions navales, il démissionne dès 1880 pour devenir administrateur des Forges et Chantiers de la Méditerranée, chantier →

naval méditerranéen dirigé par Dupuy de Lôme, comme on l'a vu plus haut. Il obtient en janvier 1888 du ministre de la Marine, l'amiral Hyacinthe Aube, zélateur de la Jeune École (favorable à la multiplicité de petites unités navales rapides), une dépêche ministérielle pour la réalisation à Toulon d'un « bateau sous-marin ». Les concepteurs avaient en effet surmonté les problèmes de stabilité en *cap* (roulis et tangage dans le plan horizontal) comme en *incidence* (lacet et tangage dans le plan vertical), par extrapolation de leurs réflexions et calculs sur les aérostats, avec la mise en place d'empennage dans les deux plans.

Enfin un vrai sous-marin

Le *Gymnote* (Q01 - numéro de la coque) reste néanmoins un engin d'études et d'essais, un tube de diamètre 1,8 m, de 17 mètres de long, armé par cinq hommes, mû par un moteur électrique – d'où son nom, à l'instar de l'espèce de poissons à défense par décharge électrique : puissance de 54 chevaux, alimentée par une batterie de 564 accumulateurs, selon les plans de Krebs, officier de sapeurs-pompiers parisien. Il est lancé au Mourillon le 17 novembre 1888 : les ingénieurs Zédé et Romazzotti avec le commandant Krebs le manœuvrent personnellement, gyroscope électrique à bord, en rade de Toulon lors des premiers essais. Le *Gymnote* atteint presque 8 nœuds en surface et la moitié en plongée, avec un rayon d'action de 65 nautiques à 5 nd. Il servira ultérieurement aux premiers essais de lance-torpilles et effectuera jusqu'en 1908 un total de près de 2 000 plongées, sans incident majeur.

De légitimes hommages

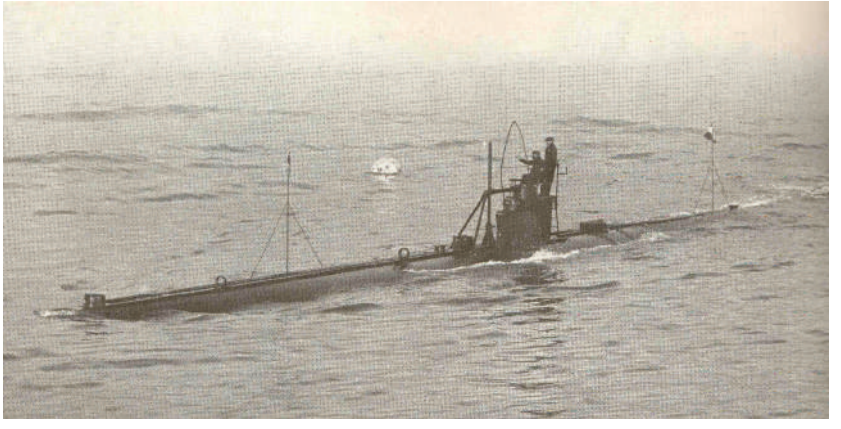
Entretemps Gustave Zédé, remonté dans la capitale, est victime d'un grave accident de laboratoire lors d'une manipulation de poudre propulsive pour torpille, qui lui brise les jambes : il en meurt le 26 avril 1891 et est enterré au cimetière du Montparnasse. Il est très remarquable que, dès le 1er mai, son nom soit donné au deuxième (Q02) sous-marin français, initialement baptisé *Sirène*, alors en construction. Cette rapidité extrême semble compenser une cravate de commandeur de la Légion d'honneur qui ne lui avait pas encore été décernée pour la réussite du *Gymnote*, en raison d'une querelle entre ministères pour l'imputation sur leurs contingents annuels respectifs… Pour la cinquième fois la Marine rend actuellement hommage à cet ingénieur exceptionnel, puisque la nouvelle série de quatre pétroliers ravitailleurs aura comme tête de série un *Gustave Zédé*, précédant trois autres noms d'ingénieurs du corps du Génie maritime : Émile Bertin (X1858), Jacques Stosskopf (X1920S) et Jacques Chevallier (X1940).

Gaston Romazzotti (X1874)

Gaston Romazzotti (neveu par alliance de Gustave Zédé !) est né en juillet 1855 à Molsheim (Bas-Rhin). Il entre à l'X à l'automne 1874 et prend la dernière des six places proposées pour l'école d'application du Génie maritime, étant 40e sur 252 au classement de sortie. Il est affecté en 1878 à Toulon, passe première classe en 1880, puis sert à Cherbourg cinq ans (1881-1886), avant de revenir à Toulon où il est chargé de la construction du premier sous-marin, le *Gymnote*, sur les plans de Gustave Zédé, oncle de son épouse, ce qui lui vaut la croix de la Légion d'honneur en mai 1890. Romazzotti dirige à Cherbourg la construction de la *Sirène* (Q02), rebaptisée en 1891 *Gustave Zédé*, qui pèse 226 t car la coque est en bronze, plus rigide ; l'engin dispose d'un moteur électrique de 750 chevaux, atteint 12,7 nd à vitesse maximale (mais 15 étaient théoriquement prévus) et d'emblée comporte un tube lance-torpilles : le navire réussira en plongée périscopique à torpiller le cuirassé *Magenta* avançant à 10 nd, démontrant que le sous-marin était bien devenu une arme de guerre, même si la stabilité en mer et le faible rayon d'action le cantonnaient, à ce stade encore expérimental, à des tâches de défense côtière.

UN CONTEMPORAIN ESPAGNOL DU *GYMNOTE*

À Carthagène, le L.V. Isaac Peral y Caballero enseigne les sciences physiques à l'*Escuela de ampliación de estudios de la Armada.* Dans un mémoire de 1885, il affirme avoir résolu les problèmes d'un sous-marin militaire et parvient à obtenir l'appui direct de la régente Marie-Christine, malgré des réticences chez les amiraux. Il peut ainsi lancer le 8 septembre 1888 un engin, le *submarino Peral*, coque en forme de cigare de 22 mètres de long, pesant 85 t, avec 12 membres d'équipage disposant d'un système d'air efficace, avec une propulsion électrique à deux hélices, muni de deux tubes lance-torpilles (une en réserve). Dépourvu de kiosque et de périscope, il atteint 10 nd et 8 en plongée. Mais des essais nocturnes satisfaisants ne compensèrent pas aux yeux de l'état-major de l'Armada la faible autonomie de l'engin, qui en outre devait remonter en surface pour lancer sa torpille, ainsi rendu visible par l'ennemi. Écœuré, Peral démissionna. Une réplique du *Peral* grandeur nature orne le musée naval de Carthagène, qui reste le port militaire espagnol des sous-marins. Il est très étonnant de constater la parfaite concomitance à l'automne 1888 du lancement toulonnais du *Gymnote*, deux mois plus tard (8 septembre - 17 novembre), sans qu'on sache s'il y avait eu ou non des relations entre ces deux sites « d'invention pratique » du sous-marin à vocation militaire.



Le *Gustave Zédé* (Q02).

Le *Narval* (Q04).

Une brillante carrière

Il développera ensuite au début du XXe siècle une série de vingt petits sous-marins à simple coque, au nom de poisson en général, donc surnommés… « les fritures » – tête de série : la *Naïade*. Ils sont tous retirés du service en 1914 en raison de leurs défauts et d'un manque de stabilité à la mer, en surface. Officier de la Légion d'honneur en 1899, promu ingénieur général en 1905 et directeur de la fonderie de Guérigny (dans la Nièvre, sur la Loire), il y met au point les chaînes d'ancre en acier. Directeur des constructions navales à Brest en 1909, il devient directeur central en 1912, promu commandeur de la Légion d'honneur en décembre. Il meurt à son domicile parisien le 18 septembre 1915. Tout comme pour son oncle, un sous-marin de la classe Lagrange (Q114), en construction, porte son nom par décision quasi immédiate du ministre de la Marine ; ce bâtiment, le *Romazzotti*, sera en service de 1918 à 1937.

Maxime Laubeuf (X1883)

Maxime Laubeuf est né à Poissy le 23 novembre 1864. Il entre à Polytechnique dès 1883 et opte pour le Génie maritime, 8e sur une promotion de 10 ; « sous-ingénieur » (grade rebaptisé « ingénieur de deuxième classe ») à Brest, il est en disponibilité d'août 1893 à juillet 1895, puis revient à l'arsenal de Cherbourg. Il passe en 1900 au grade d'ingénieur en chef, assorti de la croix de chevalier de la Légion d'honneur en juillet. Affecté l'année suivante à Toulon, promu ingénieur en chef de première classe en 1905, de retour à Cherbourg début 1906, il démissionne le 27 octobre pour entrer chez Schneider où il a les coudées franches pour développer ses conceptions de submersibles. Il rejoindra ultérieurement les Ateliers et Chantiers de Bretagne. Ses percées techniques puis le rôle des sous-marins durant le premier conflit mondial, qui tous, Allemands au premier chef, s'inspirent de ses grands choix techniques, lui valent une grande notoriété et un brillant cursus dans notre ordre national : officier en 1919, commandeur en 1923, puis grand officier en janvier 1936. Admis à l'Académie de marine, il deviendra membre de l'Académie des sciences. Il avait écrit en 1915, puis repris en l'élargissant en 1917, un ouvrage réputé *Sous-Marins et Submersibles*. Il meurt et est enterré à Cannes le 23 décembre 1939.

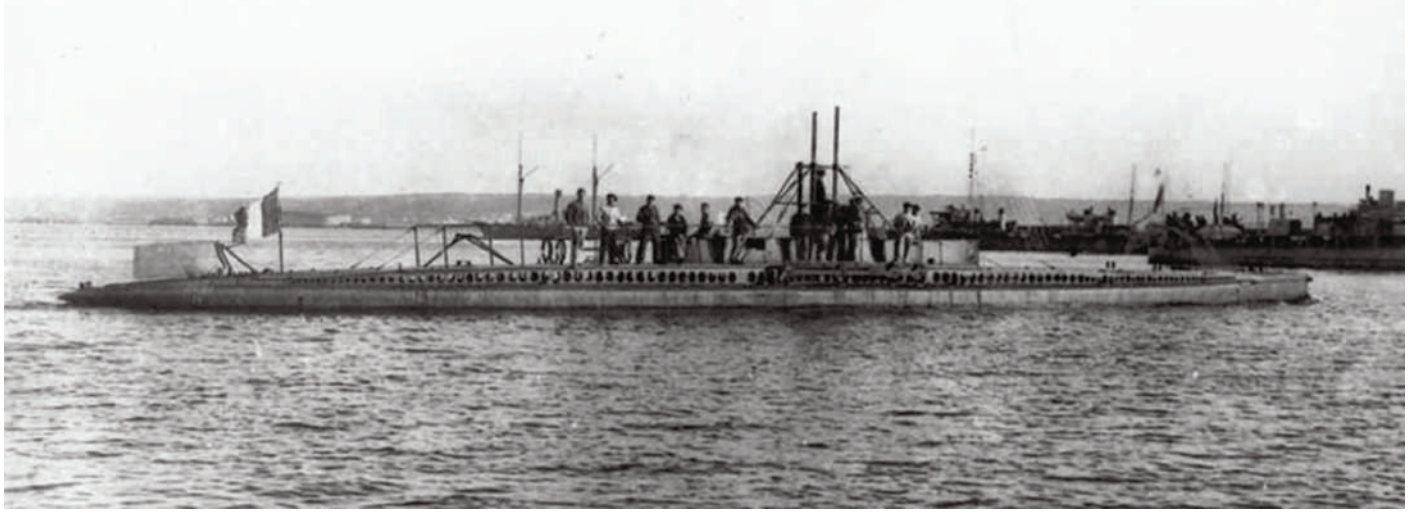
Deux idées fondamentales

Lors du concours du ministre de la Marine Lockroy (cf. encadré page 77) pour un « torpilleur sous-marin », Laubeuf retient dans son projet deux principes de base. D'une part une double coque, le cigare du sous-marin étant logé à l'intérieur de la coque d'un torpilleur. →

L'espace entre les deux sert pour les ballasts, ainsi placés hors de la coque épaisse, ce qui accroît significativement l'espace intérieur disponible du sous-marin et permet une profondeur de plongée plus grande, avec des ballasts plus volumineux, tout en améliorant largement la tenue à la mer par la forme de la carène, plus appropriée, d'un navire de surface. *A posteriori*, on peut dire qu'il a été le seul à interpréter à la lettre le titre du concours ! D'autre part, une double propulsion, à vapeur pour la surface et électrique en plongée, permet de recharger les accumulateurs de la seconde par la première et donc d'allonger largement le rayon d'action du navire, plus la sécurité de ne pas dépendre exclusivement de moteurs électriques, encore fragiles à l'époque.

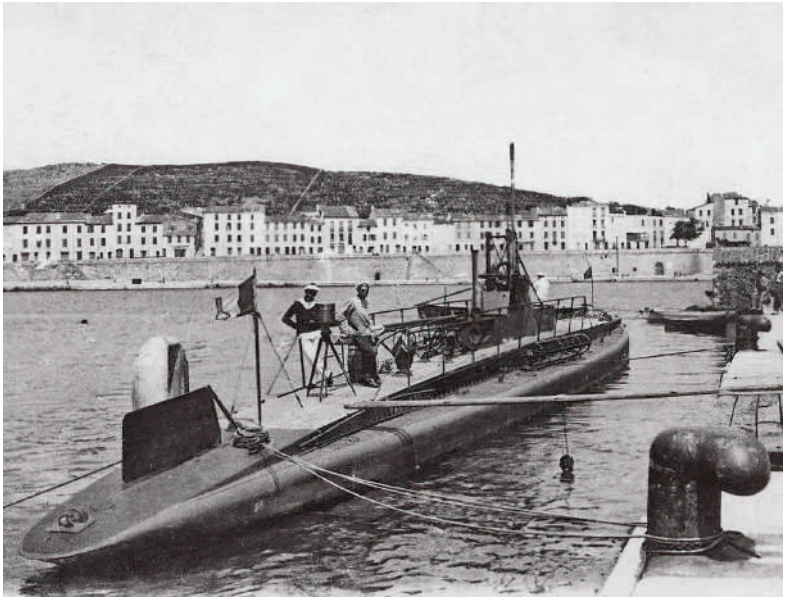
Le Narval, succès majeur

Cette vision féconde conduit à lui commander le *Narval* (Q04), « torpilleur submersible » d'environ 200 tonnes à plongée rapide. Les essais furent si satisfaisants que ce prototype participa à la revue navale de Cherbourg en juillet 1900, devant le président de la République (Émile Loubet – bien connu dans la Marine, puisque le portrait officiel du Président de la République en exercice sur un bâtiment de guerre, parcelle mobile du territoire national, s'appelle toujours un *loubet*, en mémoire de celui qui imposa cet usage). Dès 1901 une première série s'ensuit dont la tête reprend le nom de *Sirène* (Q05), suivie du *Triton* (Q06), puis de l'*Espadon* (Q13) et de la *Silure* (Q14) qui serviront durant le premier conflit mondial. Tous seront ensuite désarmés en 1919. Il



L'*Aigrette* (Q38).

La *Sirène* (Q05).



La *Cigogne* (Q39).

perfectionne le *Narval* – déjà muni d'un périscope – avec l'*Aigrette* (Q38) et la *Cigogne* (Q39), mais les onze suivants prévus dans la série seront annulés. Il avait pourtant remplacé la propulsion vapeur par le diesel, idée qui est ensuite universellement adoptée car elle résout le gros des problèmes induits par la chaleur : la corrosion des conduits et de la cheminée d'évacuation, de même que le niveau de la température ambiante à bord qui était à la limite du supportable pour l'équipage.

Une avance internationale

Laubeuf réussit ainsi à grandement améliorer le tonnage et le rayon d'action puisqu'en 1912 ses submersibles font les trajets directs Rochefort-Toulon (par le *Faraday*) et Brest-Bizerte (par le *Papin*). La Marine française dispose, grâce à cet ingénieur de grand talent, d'une avance en matière de sous-marins, arme navale nouvelle qui serait susceptible par leurs torpilles de concurrencer les grands cuirassés issus du concept anglais du *Dreadnought*. Son nom a été légitimement donné dans la fin des années 1980 à la grande forme de construction à plat des sous-marins de l'arsenal de Cherbourg, dont le volume interne utile correspond à… onze fois les dimensions de l'Arc de Triomphe.

Dans sa version à propulsion nucléaire et lanceur de missiles chargés de bombes atomiques, le sous-marin mis au point par les ingénieurs du Génie maritime reste au XXIe siècle, en logique de dissuasion, l'*ultima ratio republicae*.

Le « concours d'idées » du ministre Lockroy

Hiérarque du parti radical-socialiste venu de l'extrême gauche (ancien Chemise rouge de Garibaldi en 1860, puis secrétaire d'Ernest Renan en Syrie durant trois ans), Édouard Lockroy sera ministre de la Marine dans le dernier lustre du XIXe siècle, au sein de plusieurs gouvernements successifs. Il se passionne pour la Marine, écrivant maints articles et six livres sur le sujet. Il met au concours en octobre 1896 le concept d'un « torpilleur sous-marin » répondant aux caractéristiques suivantes : déplacement de 200 t, vitesse opérationnelle de 12 nd, franchissement de 100 N à 8 nd, embarquement de deux torpilles prêtes à l'emploi. Bien qu'initialement écartés, les officiers d'active sont finalement autorisés à participer, le prix se transformant pour eux en médaille.

45 projets sont remis. Le jury décerne cinq médailles d'or *ex aequo* aux ingénieurs du Génie maritime Chéron, Laubeuf, Maugas, Romazzotti, ainsi qu'au L.V. Darrieus, alors commandant du *Gymnote*, futur amiral (à la réputation de technicien très affirmée). Un civil, Stefan Drzewiecki, ingénieur russo-polonais d'origine, fort connu car il avait vendu plusieurs sous-marins à propulsion humaine à divers États dont la Russie, avant de lancer le premier, en 1884, le concept d'une propulsion électrique pour les submersibles, se contente de remettre un projet d'appareil de lancement de torpilles, également primé, en 2e rang, mais sans premier prix attribué dans la catégorie ! Le ministre donne suite aux projets des lauréats : outre Laubeuf, Romazzotti peut poursuivre la mise au point du *Morse* (Q03) lancé en 1899, qui est une sorte d'intermédiaire entre le *Gymnote* et le *Gustave Zédé* avec ses 149 t pour 36,5 m de long.

Le *Farfadet* (Q07) est lui l'œuvre de Gabriel Maugat (X1884), tête d'une série de quatre bâtiments (*Korrigan* Q08, *Gnôme* QO9 et *Lutin* Q10). Malheureusement le *Farfadet*, stationné à Bizerte, disparaît par 10 mètres de fond, engloutissant le 6 juillet 1905 treize membres d'équipage (un survivant, l'autre succombant à ses blessures) : renfloué, le bâtiment sera rebaptisé le *Follet*. Ce premier drame sera suivi le 16 octobre 1906 par la perte du *Lutin* avec tout son équipage, presque au même endroit, par 36 mètres de fond. Cette double tragédie de la Marine nationale n'est pas sans trouver écho avec les disparitions ultérieures de la *Minerve* et de l'*Eurydice*, au large de Toulon, en 1968 et janvier 1970. Ces catastrophes entraînèrent la condamnation de la classe. Maugas, entretemps, avait fortement contribué à améliorer le fonctionnement des diesels sous-marins et mis au point l'hélice à pas variable qui simplifie la mise en œuvre de la marche arrière. Collaborateur de Foch durent la guerre, ingénieur général, commandeur de la Légion d'honneur en 1921, il dirigera ensuite les Forges et Hauts-Fourneaux de Differdange, au Luxembourg.

EN IMAGES

PAR MARC DARMON (X83)

SIBELIUS : CONCERTO POUR VIOLON ROSSINI : OUVERTURE DE SÉMIRAMIS SCHUMANN : SYMPHONIE Nº 3 « RHÉNANE »

LEONIDAS KAVAKOS, VIOLON. ORCHESTRE PHILHARMONIQUE DE BERLIN, DIRECTION SIR SIMON RATTLE

UN DVD OU UN BLU-RAY EUROARTS

Depuis trente ans, le Philharmonique de Berlin donne un concert annuel, l'Europakonzert, le 1er Mai dans une ville d'Europe. En 2015, l'Europakonzert a eu lieu à Athènes (comme onze ans plus tôt pour le concert joué à l'Odéon d'Hérode Atticus commenté ici en décembre 2007, déjà dirigé par Sir Simon Rattle).

Ce concert, dans la célèbre salle du Megaron d'Athènes, débute par la vive ouverture de l'opéra *Sémiramis* (1823) de Gioacchino Rossini. Ce dernier opéra italien de Rossini (il écrira désormais pour Paris) d'après la pièce de Voltaire, qui a la reine de Babylone comme héroïne, n'est plus guère connu que pour l'ouverture et deux airs magnifiques. Il s'agit d'un *opera seria*, comme *Tancrède* ou *La Donna del lago*, de style belcantiste mais bien sûr moins enlevé que les opéras célèbres de Rossini comme *Le Barbier de Séville* ou *La Cenerentola*. Pourtant l'ouverture est pleine d'humour, voire d'espièglerie, parfaitement rendus par les magnifiques instrumentistes de Berlin. Notamment les vents (dont un piccolo souverain) font rayonner cette ouverture, qui devient un superbe hors-d'œuvre pour ce concert marquant.

Le plat de résistance de la première partie de ce concert est naturellement l'incroyable *Concerto pour violon* écrit par Jean Sibelius en 1905, seul concerto du compositeur finlandais. Simon Rattle adore Sibelius, nous en avons commenté ici en juin 2017 l'intégrale des symphonies avec ce même orchestre. Et le soliste violoniste « local » Leonidas Kavakos est un grand spécialiste de ce concerto. Il en joue d'ailleurs souvent la très rare version originale (1904), qu'il a interprétée à la Philharmonie de Paris il y a quelques années, nous y étions, et il l'a enregistrée (label Bis, disque très très intéressant et récompensé de nombreuses fois). Mais, ce soir-là, c'est la version bien connue de 1905, créée sous la direction de Richard Strauss, qui est interprétée par Rattle et Kavakos, et son violon lumineux (un stradivarius de 1724).

En seconde partie, Rattle rappelle aux auditeurs athéniens l'origine et la spécialité de son orchestre, peut-être le plus beau du monde, avec la *Troisième Symphonie* de Robert Schumann. On le sait, les quatre symphonies de Schumann sont souvent dénigrées, au motif qu'elles seraient faiblement orchestrées (c'est faux) et que Schumann a donné le meilleur de son génie dans son œuvre pour piano (c'est vrai). Jugez vous-mêmes avec cette brillante *Symphonie rhénane*, curieusement en cinq mouvements.

Hommage au Rhin, dans lequel Schumann à la fin de sa vie se jettera. ×

DISCOGRAPHIE
PAR JEAN SALMONA (X56)

UNE SYMPHONIE INACHEVÉE, LA 9e DE BRUCKNER

L'inachevé, l'incomplétude seraient essentiels à toute perfection.
Christian Bobin, *Souveraineté du vide*

Les raisons pour lesquelles une œuvre n'a pu être menée à son terme sont presque toujours nimbées de mystère, ce qui fait dire souvent des âneries aux commentateurs. Ainsi du *Requiem* de Mozart, de la *10e Symphonie* de Mahler, de la *7e* dite *Symphonie inachevée* de Schubert, et bien entendu de *L'Art de la fugue* de Bach. C'est qu'il s'agit en général d'œuvres tardives, dont la composition a été interrompue par la mort du compositeur.

Du coup, des âmes bien intentionnées, disciples ou admirateurs, se mettent en devoir d' « achever » l'œuvre inachevée, donnant toujours naissance à des monstres. Qui n'a pas été transporté et bouleversé par l'interruption abrupte du dernier contrepoint de *L'Art de la fugue*, une fugue sur le nom de B.A.C.H., laissant en suspens la dernière note pour l'éternité ? La même fugue « terminée » par un musicien dont le savoir-faire n'est pas en cause laissera l'auditeur de glace.

La *9e Symphonie en ré mineur* de Bruckner comporte trois mouvements : *feierlich – misterioso* ; *scherzo* ; *adagio – feierlich*. Le 4e mouvement, qui devait intégrer une fugue et une citation de son *Te Deum*, n'a pas dépassé le stade de l'esquisse. Faut-il le regretter ?

Certainement pas, et voici pourquoi. Tout d'abord, dès la première écoute, on sait que l'on est en présence d'une œuvre majeure, en réalité une des plus fortes du XIXe siècle finissant. Le style, unique, est à l'intersection de Wagner, Mahler et… Scriabine, frôlant parfois l'atonalité. Les lignes mélodiques sont lyriques, avec d'incessantes modulations. L'orchestration est extraordinairement fouillée, faisant la part belle aux violoncelles, aux contrebasses et aux cuivres. L'architecture est complexe mais claire. Le

premier mouvement installe le propos, comme une ouverture : c'est d'une œuvre exceptionnelle qu'il s'agit, à la limite de la tragédie. Le second mouvement, bref, violent, le confirme. Et voici que le troisième mouvement, l'adagio, vous saisit à la gorge et ne vous lâche plus – la mort, l'amour, la vie, comme dans le poème d'Éluard – jusqu'à sa résolution finale, sereine, apaisée, ineffable. On voit bien que l'intention initiale de Bruckner, avec un 4e mouvement grandiose, aurait fait de cette œuvre une cathédrale bien installée sur des certitudes, alors que l'adagio laisse la fin en suspens. Au fond n'est-ce pas la finalité, voulue ou inavouée, de toute œuvre inachevée : finir sur une interrogation ?

Iván Fischer vient d'enregistrer la *9e Symphonie* de Bruckner avec le Budapest Festival Orchestra. Il sépare bien les divers plans sonores, comme l'aurait fait Boulez, et rend intelligible une structure complexe, tout en magnifiant le pouvoir émotionnel de cette œuvre magique, à la manière de Bernstein. Un très grand disque.

1 CD CHANNEL

CINÉMA

PAR CHRISTIAN JEANBRAU (X63)

MARIA RÊVE / CHRONIQUE D'UNE LIAISON PASSAGÈRE / LES ENFANTS DES AUTRES / NOVEMBRE / UN BEAU MATIN / SANS FILTRE

Maria rêve

Réalisateurs : Lauriane Escaffre & Yvo Muller – 1 h 33

Un titre qui n'accroche pas et un passage promotionnel sur France Inter où Karin Viard m'agace. Mais il y avait les conseils de ma fille et… c'est absolument délicieux. Grégory Gadebois n'est pas Clint Eastwood et pourtant on est, d'une certaine façon, *Sur la route de Madison* (avec *happy end !*). Les deux acteurs sont émouvants, Karin Viard parfaite et Grégory Gadebois plein d'une poésie lunaire étonnante. Des seconds rôles attachants et drôles (charmante Noée Abita, mais tous sont bons). Et une mise en boîte savoureuse des Beaux-Arts parisiens, cadre de l'action ! Je redis : délicieux ! ×

Chronique d'une liaison passagère

Réalisateur : Emmanuel Mouret – 1 h 40

C'est l'histoire d'un type qui doute et d'une grande bringue extravertie. Deux acteurs totalement investis, Sandrine Kiberlain et Vincent Macaigne, transforment cette rencontre absurde en une course poursuite après la liberté d'un hédonisme sans limites et sans engagement. Les dialogues sont au cordeau, intelligents, enlevés, et la jubilation du lâcher-prise qui souffle sur le film devrait tout emporter. Quatre amis devant l'écran. Les trois autres ont aimé sans réserve. Je suis resté un cran en dessous, admiratif devant une évidente réussite, et pourtant extérieur à ce couple qu'on me montrait, trop en lévitation pour croiser ces références à l'expérience personnelle qui emportent intimement le spectateur dans une comédie romantique. ×

Les enfants des autres

Réalisatrice : Rebecca Zlotowski – 1 h 43

Ça ne fonctionne pas. J'attendais trop de ce film ? Erreur de casting ? Virginie Efira (Rachel) est bien, mais Roschdy Zem (Ali) ne semble pas à sa place. J'aime l'acteur mais son image ne colle pas au rôle. Les dialogues amoureux sont mièvres, les scènes de sexe ont quelque chose (mais quoi ? *that is the question*) « d'à côté », peut-être parce que trop à l'écart de ce qui veut être le sujet central, le désir d'enfant chez elle et la difficulté du report sur l'enfant de l'autre. Entravé par l'amour paternel et encore englué dans sa conjugalité évanouie, Ali tâtonne et l'affaire part en quenouille dans une retenue générale qui décrédibilise la profondeur affirmée des sentiments. C'est la victoire de la médiocrité du quotidien. ×

Novembre

Réalisateur : Cédric Jimenez – 1 h 47

Cinq jours d'agitation policière débridée post-Bataclan. Impressionnant d'adrénaline mais on s'y perd un peu, le manque de lisibilité s'infiltre dans la succession trépidante des plans. La traque de Ben Laden, le *Zero Dark Thirty* de Kathryn Bigelow, prenait davantage. L'enquête il est vrai pouvait y être « au long cours ». Quand même, l'impression soudaine d'une équipe de cinéma, d'acteurs, en train de jouer serré, menu, haché, le non-réel qu'est la fiction, même ultra-documentée, s'installe. C'est ça et ça n'a pu être exactement ça. Les mâchoires serrées de Dujardin, ça reste du cinéma. *Revoir Paris*, autre approche, passait mieux. On oubliait le casting. Ici, il est omniprésent. Tous jouent l'action avec une conviction féroce… et je ne suis pas parvenu entièrement à y croire. ×

Un beau matin

Réalisatrice : Mia Hansen-Løve – 1 h 52

C'est une sorte de documentaire (au bout du compte assez déprimant) sur la vie d'une mère célibataire attachée à un père qui perd ses boulons et à un amant mièvre et indécis. Léa Seydoux se coiffe à la Jean Seberg, plus *à l'Ouest* que Pascal Greggory tu meurs, et Melvil Poupaud s'épuise à quitter sa femme. Nicole Garcia, là au milieu, déploie sa brusquerie brownienne à la recherche d'un Ehpad convenable où caser son pauvre ex-mari Pascal avec qui elle a fait dans le temps Léa, cause des hésitations et palinodies de Melvil. J'ai dit déprimant ? Bah, au fond, il y a comme un petit charme, celui de la vie comme elle va. ×

Sans filtre
Réalisateur : Ruben Östlund – 2 h 29

Pourquoi ce titre français insipide ? On remarque Charlbi Dean Kriek, éclatante de beauté au long du film et morte brutalement à New York le 29 août dernier, à 32 ans. Et le film, lui ? Passionnant serait trop, intéressant pas assez, riche certainement, dans le balayage de nombreux thèmes (sans véritable originalité toutefois) présentés avec un souci quasi pédagogique, brassant la lutte des classes, l'inconscience des privilégiés, la prise de pouvoir des dominés rendus par les circonstances dominants, l'amour peut-être, en trois chapitres : du sérieux réfléchi, puis du burlesque, puis une gravité un peu tiède… Palme d'or, Cannes 2022 ? Il faut aller se faire sa religion. ×

Récréations scientifiques

par Jean Moreau de Saint-Martin (X56)
jmsm56@melix.net

1. OÙ VA LA PERLE ?
Une boucle circulaire (rayon R) de fil de fer tourne à la vitesse constante ω autour de son diamètre vertical Oy. Une perle (masse m) y est enfilée, sans frottement. Déterminer ses positions d'équilibre et leurs stabilités.

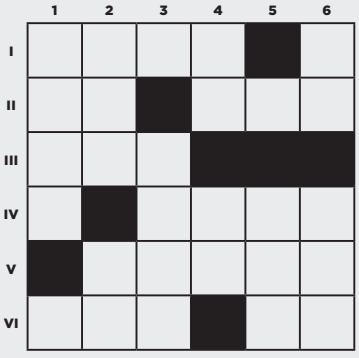
2. CARRÉS À RALLONGE
a/ On considère la suite 49, 4489, 444889, …, où chaque terme est obtenu en insérant 48 au milieu du précédent. Montrer que tous les termes sont des carrés, et déterminer la suite des racines de ces carrés.
b/ Si N s'écrit avec m chiffres 9, quelle est la somme des chiffres de son carré ?

3. SOLUTION UNIQUE
Pour $a < 1$, la fonction a^x est décroissante, ce qui garantit que l'équation $a^x = x$ a une solution unique. Existe-t-il une valeur de $a > 1$ telle que l'équation $a^x = x$ ait une solution unique ?

Nombres croisés

www.fortissimots.com

GRILLE N° 2



HORIZONTALEMENT
I. Une année révolutionnaire. **II.** Un département bien connu des rappeurs français. Début du règne de la dynastie capétienne. **III.** Début de l'Hégire, point de départ du calendrier musulman. **IV.** En mètres, la longueur d'un mille nautique. **V.** En lieues, la longueur d'un voyage sous-marin. **VI.** Multiple de 11. Quelques années de mariage pour des noces de saphir.

VERTICALEMENT
1. Une année importante pour la décolonisation. **2.** Charles Martel stoppe les Maures à Poitiers. Un chiffre qui rappelle les flics. **3.** Le vrai début du XXIIe siècle. **4.** Presque cent. L'âge limite des cardinaux pour voter lors d'une élection papale dans un conclave. **5.** Un nombre fétiche pour une paire de jean's. **6.** C'est l'Eure. Un petit modèle de la gamme Peugeot.

Bridge

par Gaston Méjane (X62)

Une donne de la dn1/4, vous jouez 6♣ en Sud.

Nord	
♠	A V 4
♥	A V 7 6 4 2
♦	A
♣	R 10 6

Sud	
♠	D 8 6 3
♥	10
♦	R 8 2
♣	A D V 9 2

Les enchères se déroulent dans le silence des adversaires :

S	N
1♣	1♥
1♠	2♦
3♣	4♦ (bw à ♣)
4♠ (30 41)	4SA
5♦ (D♣ et R♦)	6♣

Ouest entame du 9♠.
Quel est votre plan de jeu ?

Retrouvez les solutions des **Nombres croisés**, du **Bridge** et des **Récréations scientifiques** en page **82** et sur **lajauneetlarouge.com/779**

Solutions des récréations scientifiques

1. OÙ VA LA PERLE ?

Soit a l'arc séparant la perle du point bas du cercle. Sur la tangente au cercle, le poids de la perle a une composante $mg \sin a$ tendant à réduire a ; la force centrifuge a une composante $m\omega^2 R \sin a \cos a$ tendant à éloigner la perle de Oy. D'où le bilan $m \sin a(g - R\omega^2 \cos a)$ vers le bas.

Sont ainsi des positions d'équilibre : le point bas ($a = 0$), le point haut ($a = \pi$), et, si $\omega > \sqrt{g/R}$, le point $a = \arccos(g/R\omega^2)$.

Stabilité : le bilan des forces au voisinage des positions d'équilibre montre que le point haut est instable ; le point intermédiaire, quand il existe, est stable ; le point bas est instable si $\omega > \sqrt{g/R}$, stable sinon.

2. CARRÉS À RALLONGE, PROPOSÉ

PAR D. INDJOUDJIAN (X41)

a/ Le nombre de $2n$ chiffres : n chiffres 4, $n - 1$ chiffres 8 et un chiffre 9, est le quotient par 9 du nombre écrit avec les chiffres 4, 4 et 1, séparés par deux blocs de $n - 1$ zéros. Ce dernier est le carré du nombre $2.10^n + 1$. Le nombre initial est donc le carré du nombre $(2.10^n + 1) / 3$, qui s'écrit avec un chiffre 7 précédé par $n - 1$ chiffres 6.

b/ $N = 10^m - 1$ a pour carré $N^2 = 10^{2m} - 2.10^m + 1$, qui s'écrit avec $m - 1$ chiffres 9, un chiffre 8, $m - 1$ zéros et un chiffre 1. La somme des chiffres de N^2 est $9m$, comme la somme des chiffres de N.

De manière analogue, on trouve $18m$ pour somme des chiffres de N^3, de même que pour la somme des chiffres de N^4.

3. SOLUTION UNIQUE

Pour $a > 1$, la fonction $y = a^x$ est croissante, de pente $a^x \ln a$.
Coupons la courbe par la droite $y = x$, le point d'intersection est unique si cette droite est tangente, d'où l'égalité des pentes $a^x / x = a^x \ln a = 1$, puis $\ln a^x = x \ln a = 1$, $x = a^x = e^{x \ln a} = e$, $\ln a = 1/x = 1/e$, $a = e^{1/e} = 1,44466786\ldots$

POST-SCRIPTUM À « BICOLORATION »

(*LA JAUNE ET LA ROUGE* DE MAI 2022)

Avec $ABCDEFG$ heptagone rouge, de même que les diagonales AE, BG, CF, les 11 autres diagonales étant jaunes, il y a seulement 3 triangles unicolores : ABG rouge, BDF et CEG jaunes.

POST-SCRIPTUM À « CENTRES ET BARYCENTRE »

(*LA JAUNE ET LA ROUGE* D'OCTOBRE 2022)

Par inadvertance, j'ai repris le mois dernier ce problème déjà proposé en février 2013. Néanmoins vous y trouvez une preuve différant de celles données en 2013, accessibles sous la référence D10442 sur le site *diophante.fr* de notre camarade Philippe Fondanaiche (X63).

Solution du bridge

On prend de l'A (le R♠ est en Est). On joue A♦, puis atout pour le 9, R♦ et ♦ coupé du 10 et R♣ pour l'A et ♣ (les atouts sont 3/2 avec 2 en Est).
Vous jouez ♥ pour l'A et Ouest défausse donc Est est 2632, le R♠ est second donc 4♠ du mort.
Résultat : 6♣ = .

Ouest	
♠	10 9 7 5
♥	
♦	D 10 9 6 4 3
♣	7 4 3

Est	
♠	R 2
♥	R D 9 8 5 3
♦	V 7 5
♣	8 5

Nombres croisés

	1	2	3	4	5	6
I	1	7	8	9	■	2
II	9	3	■	9	8	7
III	6	2	2	■	■	■
IV	0	■	1	8	5	2
V	■	2	0	0	0	0
VI	1	2	1	■	1	6

HORIZONTALEMENT

I. 1789. **II.** 93. 987. **III.** 622. **IV.** 1852. **V.** 20 000. **IV.** 121. 16.

VERTICALEMENT

1. 1960. **2.** 732. 22. **3.** 2 101. **4.** 99. 80. **5.** 501. **6.** 27. 206.

ANTARTICA

PHILIPPE BISMUT (X74)

Éditions Vérone, août 2022

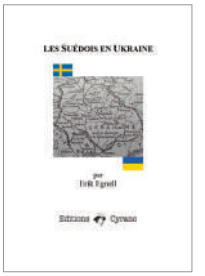
Un petit livre, 66 pages, mais un contenu qui a du sens, surtout dans ces temps que vit l'entreprise ! Philippe Bismut a débuté sa carrière dans le secteur public. Fasciné par la révolution numérique, il s'engage pendant plusieurs années dans l'industrie électronique puis dans les services électroniques. Embauché par une société américaine pour diriger sa filiale française, il découvre un management animé par un objectif de rentabilité qui est impensable à court terme et se fait licencier rapidement. Chassé pour un poste de patron de la filiale d'une entreprise britannique, qui cadre parfaitement avec son expérience et ses capacités et, malgré des mises en garde, il est embauché comme directeur de la filiale française.

Et Philippe Bismut revit la même histoire : management autoritaire et incompréhension des problèmes spécifiques de la filiale. Le président, avec dureté, voire méchanceté, ne connaît que les rentabilités élevées et la méthode forte. La maison mère ne comprend pas le marché de sa filiale française : celle-ci a une activité importante de mise à disposition de personnel de technicité moyenne chez le client ; et ce qu'on lui demande, ce sont des prestations de haute technicité, à forte valeur ajoutée, ce qui exige un changement du personnel… et Philippe se fait virer !

Exemple intéressant de difficultés liées à des approches différentes ! Les affaires sont mondiales et le personnel international. Et cette tendance ne devrait que s'accentuer : le périmètre des entreprises est de plus en plus variable et le personnel de plus en plus amené à travailler avec du personnel d'autres cultures ! ×

Christian Maldidier (X54)

Éditions Vérone, 75008 Paris. Tél. : 01 83 62 34 40. www.editions-verone.com



LES SUÉDOIS EN UKRAINE

ERIK EGNELL (X57)

Éditions Cyrano, juillet 2022

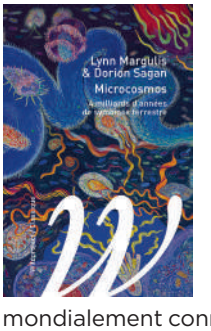
Basé sur une érudition certaine et parfois foisonnante, ce livre, écrit après la récente agression russe, rappelle les liens des Vikings orientaux, appelés Varègues, avec les territoires situés à l'est de la mer Noire. Par une approche fluviale, ces Varègues vont créer à la fin du neuvième siècle la Rus de Kiev, région aux contours imprécis s'étendant bientôt jusqu'à Novgorod, au fil des règnes tumultueux de chacun. Confrontée aux Mongols de la Horde d'Or, la Rus devra leur payer tribut pendant deux siècles. Quant aux relations complexes des Kiéviens avec la Suède, la Pologne, les Cosaques et la Moscovie rebaptisée *in fine* Russie, elles se terminent après une ultime tentative de liens avec le roi suédois Charles XII, lors de la prise de contrôle de l'Ukraine par Pierre le Grand après la bataille de Poltava.

Servi par des citations abondantes, avec de constantes et souvent amusantes observations personnelles jetées au fil des pages, le texte est nourri d'anecdotes et de drames. Parmi ceux-ci, l'épopée tragique de Charles XII est relatée avec beaucoup de vigueur par Voltaire, peu connu sur ce sujet.

Bref, l'on ne saurait que recommander la lecture de ce livre érudit à ceux que préoccupe l'histoire de l'Ukraine, territoire dont les frontières et les vassalités ont beaucoup changé au cours des siècles. ×

Gilles Cosson (X57)

Éditions Cyrano, lieu-dit Manègre, 24440 Église-Neuve-d'Issac. www.editions-cyrano.fr.



MICROCOSMOS

4 MILLIARDS D'ANNÉES DE SYMBIOSE TERRESTRE

LYNN MARGULIS ET DORION SAGAN
TRADUCTION ANNE DE BEER ET GÉRARD BLANC (X68)

Éditions Wildproject, réédition, mai 2022

Parmi les scientifiques, certains visionnaires comme Darwin, Einstein ou Bohr sont capables de remettre en question le paradigme ambiant en affrontant la critique. En lisant Lynn Margulis, on n'hésite pas à la placer dans cette catégorie. *Microcosmos* date de 1986 et pourtant il est plus que jamais d'actualité. L'auteure est mondialement connue pour avoir démontré que, dans les cellules des êtres vivants, différents organites provenaient d'anciennes bactéries, d'abord absorbées et tolérées, puis progressivement transformées en organes de la cellule. Pour elle, une telle symbiose n'est pas un simple accident survenu par le hasard dans l'histoire de l'évolution, mais bien un principe général du vivant. La vie ne repose pas uniquement sur la compétition darwinienne entre individus, mais tout autant sur les symbioses entre eux. Les découvertes récentes sur l'importance du microbiote pour notre organisme n'en sont-elles pas une démonstration éclatante ? À travers une fascinante histoire de la bactérie jusqu'à l'Homme, occupant le gros du livre, on comprend qu'il faut voir la vie comme un tout, la biosphère, qui coévolue avec son environnement : la lithosphère, l'aquasphère et l'atmosphère. *Microcosmos* nous donne un éclairage pour comprendre les futures théories sur l'origine de la vie : en effet, plutôt que rechercher un hypothétique réplicateur originel, on s'intéresse de plus en plus à la façon dont les premiers métabolismes organiques ont émergé du minéral, à la frontière entre l'hydrosphère et la lithosphère. Un ouvrage séminal, à lire absolument. ×

Michel Galiana-Mingot (X68)

Microcosmos: Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors. *Titre original de la première édition en 1986 de l'éditeur Summit Books, New York. Éditions Wildproject, réédition et traduction révisée, 12, boulevard National, boîte 52, 13001 Marseille. www.wildproject.org*

CARNET PROFESSIONNEL

En partenariat avec NOMINATION

JEAN-CLAUDE LAROCHE
× 1982
est nommé directeur de mission auprès de la présidence d'Enedis.

GUILLAUME BUC
× 1985
est nommé directeur technique de FineHeart.

LOÏC DOGUET
× 1985
est nommé hSEQ and industrial director de Seppic.

CHRISTOPHE LEBLANC
× 1986
est nommé head of the Group Operational Resilience Mission de Société générale.

FRANÇOIS STEPHAN
× 1986
est nommé director of Paris Eiffel campus d'OMNES Education.

JEAN FERRÉ
× 1988
est nommé chief innovation and strategy officer de Vantiva.

PATRICK SIMON
× 1988
est nommé directeur général délégué développement Boralex Europe de Boralex France.

JÉRÔME YOMTOV
× 1991
est nommé chief operating officer France de Nfinite.

SYLVAIN GÉRON
× 1992
est nommé chief technical officer de Carrefour France.

PAUL DE LEUSSE
× 1992
est nommé directeur général de Sienna Investment Managers France.

GRÉGORY TAILLARD
× 1992
est nommé directeur général délégué de HSBC Asset Management en France.

LAURE FAU
× 1993
est nommée secrétaire générale de l'École polytechnique.

JEAN-BAPTISTE PROST
× 1994
est nommé directeur général adjoint d'Oktal.

MATHIEU WEILL
× 1994
est nommé directeur du numérique au ministère de l'Intérieur et des Outre-mer.

JEAN-PHILIPPE DUFOUR
× 1995
est nommé associé et directeur général délégué de Hybrid Propulsion for Space.

THOMAS GUYOT
× 1996
est nommé directeur du pôle Produits de Crédit Mutuel Arkéa.

STÉPHANIE SCHAER
× 1997
est nommée directrice interministérielle du numérique au ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique.

LAURENT JUMELLE
× 1998
est nommé directeur exécutif adjoint de MSH International.

LAURA CHAUBARD
× 1999
est nommée directrice générale de l'École polytechnique et membre du comité exécutif de l'Institut Polytechnique de Paris.

CAMILLE BONIN
× 2000
est nommé directeur interrégional Grand Ouest de CDC Habitat.

ANTHONY BRIANT
× 2000
est nommé directeur d'École des Ponts ParisTech.

SARAH TEYSSIER-MIKO
× 2000
est nommée directrice du studio de Cube Paris.

PIERRE PRIBILE
× 2001
est nommé secrétaire général des ministères chargés des Affaires sociales.

BENOÎT ROCHET
× 2001
est nommé directeur général du port de Boulogne-Calais de la Société des Ports du Détroit.

QUENTIN MUNIER
× 2002
est nommé executive vice-president Programmes, Strategy, Research and Technology de Safran.

BASTIEN MARTINI
× 2003
est nommé chief operating officer de DeepReach.

OLIVIER REDOULÈS
× 2003
est nommé directeur des études de Rexecode.

AURIANE CANO-CHANCEL
× 2005
est nommée head of Oncology d'AstraZeneca France.

JESS WIZMAN
× 2007
est nommé directeur de Capza.

OLIVIER SARFATY
M 2008
est nommé directeur exécutif France de J.P. Morgan Banque privée de J.P. Morgan France.

PIERRE-PHILIPPE CRÉPIN
× 2012
est nommé responsable ESG d'Eiffel Investment Group.

OLIVIER GLOAGUEN
M 2014
est nommé directeur de cabinet du président-directeur général de Groupe ADP.

Annoncez une nomination
sur http://www.nomination.fr/nominations/organigramme-decideurs/fpfonction.php?idpartner=1447

CARNET POLYTECHNICIEN

NAISSANCES

× 1957 FRANÇOIS DE LAMBERTERIE
fait part, avec son épouse Danielle, de la naissance de son premier arrière-petit-enfant, Ysé, fille de Basile et Sayuri de Bure, le 22.5.2022.

× 1984 BRUNO ANGLES
fait part de la naissance de sa deuxième petite-fille, Garance Angles, fille de Thibault et Charlotte et sœur de Victoire, le 25.9.2022.

DÉCÈS

× 1938 MICHEL DESCHIRON
décédé le 16.1.2021.

JEAN-CLAUDE LEGRAND
décédé le 6.9.2022.

× 1941 BERNARD GODEAU
décédé le 29.10.2021.

× 1943 NOËL COJAN
décédé le 4.3.2022.

BERNARD DUPLANTIER
décédé le 20.12.2021.

GUY ESCULIER
décédé le 15.9.2021.

PIERRE FAVIER
décédé le 4.8.2012.

PHILIPPE FRIEDEL
décédé le 22.4.2022.

JULES LEVEUGLE
décédé le 14.6.2020.

JEAN PINGUET
décédé le 9.8.2009.

DANIEL TREMBLOT DE LA CROIX
décédé le 2.7.2022.

× 1945 FRANÇOIS BOYAUX
décédé le 7.10.2022.

× 1946 JEAN CONNAULT
décédé le 3.9.2022.

× 1948 JEAN BUSSAC
décédé le 7.10.2022.

× 1959 JEAN-PHILIPPE LE MARTRET
décédé le 30.9.2022.

× 1950 JACQUES LEFEVRE
décédé le 7.10.2022.

× 1975 JEAN-PIERRE BATISSE
fait part du décès de sa mère Marie-Louise née Michel, grand-mère de Cécile Jost (X05), le 13.9.2022.

× 2005 CÉCILE JOST
fait part du décès de sa grand-mère Marie-Louise née Michel, mère de Jean-Pierre Batisse (X75), le 13.9.2022.

Envoyez vos annonces :
annuaire@ax.polytechnique.org ou *via* notre formulaire lajauneetlarouge.com/proposer-une-annonce/
Les annonces sont gratuites.

TRANSFORMATION
STRATÉGIQUE

INNOVATION
DIGITALE

PERFORMANCE
D'ENTREPRISE

COMPÉTITIVITÉ
PRODUIT

Pour Porsche Consulting un tournant stratégique n'est pas une menace, c'est une occasion de doubler.

Porsche Consulting accompagne les entreprises du monde entier dans les secteurs suivants: services de mobilité, automobile, aviation, spatial, transport, défense, biens et services industriels, biens de consommation, distribution, santé et energie.

Porsche Consulting regroupe 720 professionnels dans 12 bureaux à travers le monde et capitalise sur 25 ans d'expérience au service de 225 clients. En France, Porsche Consulting a été lancé en 2019 et compte 20 consultants basés à Paris.

porsche-consulting.com

Porsche Consulting
Strategic Vision. Smart Implementation.

1365 CLOS DES LAMBRAYS 1593 CHÂTEAU D'YQUEM 1668 DOM PÉRIGNON 1729 RUINART 1743 MOËT & CHANDON 1765 HENNESSY 1772 VEUVE CLICQUOT 1780 CHAUMET 1803 OFFICINE UNIVERSELLE BULY 1815 ARDBEG 1817 COVA 1828 GUERLAIN 1832 CHÂTEAU CHEVAL BLANC 1837 TIFFANY&CO 1843 KRUG 1843 GLENMORANGIE 1846 LOEWE 1849 ROYAL VAN LENT 1849 MOYNAT 1852 LE BON MARCHÉ 1854 LOUIS VUITTON 1858 MERCIER 1860 TAG HEUER 1860 JARDIN D'ACCLIMATATION 1865 ZENITH 1870 LA SAMARITAINE 1884 BULGARI 1895 BERLUTI 1898 RIMOWA 1908 LES ECHOS 1914 PATOU 1916 ACQUA DI PARMA 1923 LA GRANDE ÉPICERIE DE PARIS 1924 LORO PIANA 1925 FENDI 1936 FRED 1944 LE PARISIEN 1945 CELINE 1947 DIOR 1947 EMILIO PUCCI 1947 PARFUMS CHRISTIAN DIOR 1952 GIVENCHY 1955 CHÂTEAU GALOUPET 1957 PARFUMS GIVENCHY 1957 REPOSSI 1958 STARBOARD CRUISE SERVICES 1959 CHANDON 1960 DFS 1969 SEPHORA 1970 CAPE MENTELLE 1970 KENZO 1972 PERFUMES LOEWE 1976 BELMOND 1976 BENEFIT COSMETICS 1977 NEWTON VINEYARD 1980 HUBLOT 1984 MARC JACOBS 1984 MAKE UP FOR EVER 1985 CLOUDY BAY 1988 KENZO PARFUMS 1991 FRESH 1992 COLGIN CELLARS 1993 BELVEDERE 1998 BODEGA NUMANTHIA 1999 CHEVAL DES ANDES 1999 TERRAZAS DE LOS ANDES 2006 CHÂTEAU D'ESCLANS 2006 HÔTELS CHEVAL BLANC 2008 KVD BEAUTY 2009 MAISON FRANCIS KURKDJIAN 2010 WOODINVILLE 2013 AO YUN 2013 MARC JACOBS BEAUTY 2017 CLOS19 2017 FENTY BEAUTY BY RIHANNA 2017 VOLCAN DE MI TIERRA 2020 EMINENTE

LVMH