

# atomQtrl : des systèmes lasers pour les technologies quantiques

Alexandre Dareau<sup>1\*</sup> et Johan Boulet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut d'Optique, F-33400 Talence, France

## Résumé

*Le programme atomQtrl, soutenu dans le cadre du plan de relance France 2030 et opéré par l'Institut d'Optique, a été lancé en 2023. Sur une durée de 5 ans, il vise à sécuriser l'approvisionnement français en lasers pour la manipulation d'atomes neutres pour les technologies quantiques, en finançant des développements ciblés auprès de laseristes et d'industriels français. Dans le cadre de ce programme, une enquête en ligne a été lancée pour sonder les usages et besoins des utilisateurs finaux de ces technologies laser, qu'ils appartiennent au secteur public ou privé. Nous présentons ici les résultats de cette étude.*

## Introduction

Les technologies quantiques exploitent la capacité d'un opérateur à manipuler et mesurer l'état quantique d'un système de façon précise et contrôlée, afin d'exploiter les propriétés de la physique quantique. Au cours des trois dernières décennies, les progrès de la recherche fondamentale ont permis de contrôler un nombre croissant de systèmes quantiques : il peut s'agir d'objets fabriqués de façon artificielle, à l'image des circuits supraconducteurs ou des "boîtes quantiques", ou d'objets présents naturellement dans notre environnement, comme des atomes ou des molécules.

Les systèmes auxquels nous nous intéressons dans le cadre du programme atomQtrl sont les atomes neutres, qui présentent plusieurs avantages : ils sont présents de façon relativement abondante et ne nécessitent pas de fabrication, ce qui les rend intrinsèquement identiques et donc particulièrement appropriés pour réaliser des mesures de précision. Il est cependant nécessaire, afin de pouvoir exploiter les propriétés quantiques des atomes neutres, d'en isoler une petite quantité puis de les piéger et les refroidir. Ces étapes passent généralement par l'utilisation de systèmes lasers – le développement de ce champ de recherche est dès son origine très fortement corrélié à la mise à disposition des technologies laser – dont les propriétés sont très spécifiques : besoins de longueurs d'onde précises, de bruits de phase et d'intensité extrêmement bas, et dans certains cas de puissances conséquentes.

Le programme atomQtrl a donc été pensé pour piloter et accompagner le développement de systèmes laser ciblés pour les applications aux technologies quantiques à base d'atomes froids. Dans le cadre de ce programme, et afin d'ajuster au mieux les efforts

de développement, nous avons lancé une enquête en ligne visant à recueillir les habitudes et besoins des utilisateurs finaux de ces technologies, qu'ils soient du secteur public ou privé. Les résultats de ce sondage sont présentés dans la suite de cet article.

## Méthodologie

L'équipe opérationnelle d'atomQtrl a préparé un sondage en ligne (Google forms), mis en ligne en mai 2025. Les questions ont été rédigées en anglais, afin de permettre à une communauté la plus large possible d'y participer. Le sondage consiste en une vingtaine de questions (liste exhaustive donnée en annexe de cet article), afin de garder un temps de réponse relativement court et maximiser la participation. Les résultats présentés ici ont été collectés entre mai et octobre 2025.

Le sondage a été diffusé via le compte LinkedIn de l'Institut d'Optique, ainsi que via des listes de diffusion permettant de toucher des acteurs pertinents (DIM QuanTip, GDR Gaz Quantiques, GDR TeQ). L'équipe opérationnelle d'atomQtrl remercie chaleureusement les responsables de ces listes pour cette diffusion. Cette campagne a permis de collecter un ensemble de 36 réponses. Nous notons que l'ensemble des participants ont complété l'intégralité du questionnaire. Parmi les 36 réponses, 8 personnes ont laissé une adresse afin d'être informées des résultats du sondage.

Dans la suite, nous analysons les résultats issus de ce sondage, en gardant en tête les potentiels biais liés aux canaux de diffusion et à un nombre de réponses qui, s'il permet de tirer une première série d'enseignements sur l'utilisation des lasers pour les technologies quantiques, reste relativement restreint.

\*Corresponding author: alexandre.dareau@institutoptique.fr

Date: 3 décembre 2025

## Présentation des résultats

### Secteurs et systèmes des participants

Un premier jeu de questions visait à identifier le secteur d'origine des participants, ainsi que les systèmes quantiques qu'ils utilisent. Les résultats sont présentés dans la Figure 1. Nous remarquons que le sondage a principalement permis de toucher des acteurs du secteur public (94%) avec seulement deux réponses émanant d'acteurs privés (6%). Il s'agit donc d'une limite de cette étude, qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs : la diffusion sur des listes principalement utilisées par les laboratoires publics, ainsi qu'une possible réticence des acteurs privés à partager des informations jugées stratégiques. Nous avons remarqué qu'une discussion directe est plus efficace avec les acteurs privés, afin de recueillir leurs besoins tout en garantissant la confidentialité des échanges.

Concernant les systèmes utilisés, une majorité des réponses concerne bien les atomes neutres (62%), cible du programme atomQtrl. Nous remarquons cependant une part importante d'utilisateurs d'autres systèmes, notamment des ions (23%), ou des molécules (8%). Les autres systèmes (boîtes quantiques, semi-conducteurs, centres NV, ...) correspondent à 8% des réponses. Les occurrences des espèces atomiques consacrent la prépondérance du rubidium, suivi par l'ytterbium, le strontium et le calcium (principalement pour les ions). Cela confirme le choix d'atomQtrl de cibler les développements concernant les trois premières espèces (Rb, Yb, Sr).

### Technologies laser utilisées

Une seconde série de questions visait à déterminer les technologies laser utilisées par les participants. Les résultats sont présentés en Figure 2. On note une prépondérance des technologies à base de semi-conducteurs, suivies à parts égales des lasers à état solide (Titane saphir, Nd Yag) et des lasers à fibre. Concernant le nombre de lasers nécessaires, on re-

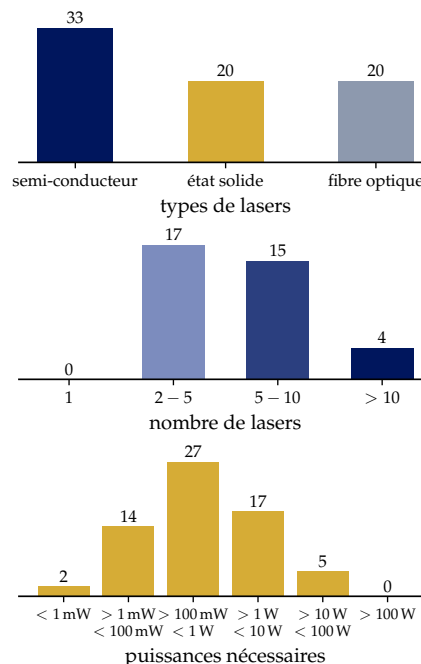


Figure 2 – Informations sur les systèmes lasers utilisés : technologies, nombre typique de systèmes lasers et plages de puissance.

marque qu'aucun participant n'a choisi la réponse "1" : les réponses indiquent un nombre typique entre 2 et 10 systèmes, et l'on note une proportion non nulle d'utilisateurs déclarant avoir besoin de plus de 10 systèmes. Enfin, les besoins exprimés en matière de puissance ont une distribution centrée sur la plage 100 mW–1 W, avec cependant dans certains cas des besoins plus importants, jusqu'à plusieurs dizaines de watts. On notera qu'aucune réponse n'a fait état d'un besoin supérieur à 100 W, ce qu'il faut sûrement mettre en regard des difficultés expérimentales à travailler avec des puissances aussi élevées.

Enfin, une question ouverte portait sur les longueurs d'onde typiques nécessaires. Les résultats sont reportés sous la forme d'un histogramme dans la Figure 3. Cette représentation fait apparaître un pic de demandes aux alentours de 800 nm, ainsi qu'une forte demande dans le proche ultra-violet, aux alen-

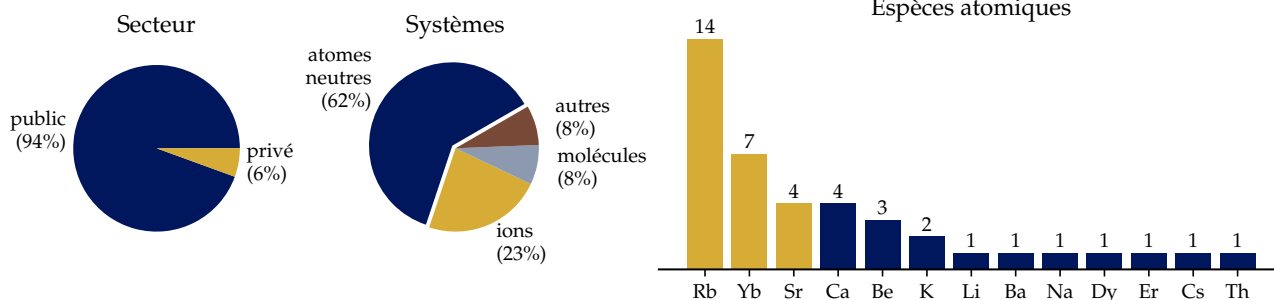
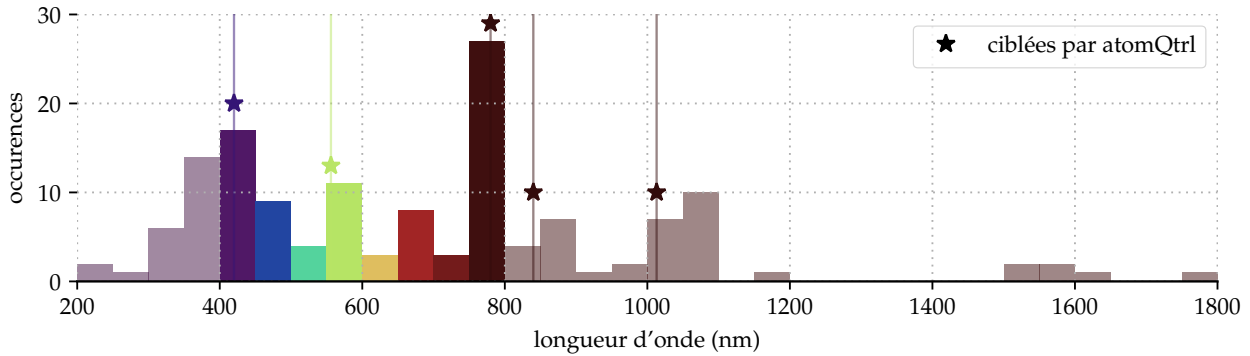


Figure 1 – Informations sur les participants : résultats des questions concernant de secteur de travail, les systèmes et les espèces atomiques utilisées. Les espèces spécifiquement visées dans le cadre d'atomQtrl (Rb, Yb, Sr) sont indiquées en jaune.



**Figure 3** – Longueurs d’onde utilisées par les participants au sondage. Des exemples de longueurs d’onde spécifiquement ciblées par le programme atomQtrl sont marqués par une étoile.

tours de 400 nm. Ces demandes sont cohérentes avec les espèces déclarées (Figure 1). On note en particulier une surreprésentation de certaines longueurs d’onde liées au rubidium (780 nm, 13 occurrences) ou à l’ytterbium (399 nm, 6 occurrences, et 556 nm, 5 occurrences). On remarque aussi la présence de longueurs d’onde correspondant plus à des solutions technologiques qu’à des critères de physique atomique purs, comme par exemple 1064 nm (5 occurrences) et 532 nm (4 occurrences). Cela traduit l’adaptation des dispositifs expérimentaux aux technologies laser disponibles, permettant sûrement ici d’obtenir des puissances conséquentes avec des systèmes largement utilisés, et pose la question de l’intégration de ce type de produits dans les développements portés par atomQtrl, pour le moment principalement ciblés sur des longueurs d’onde spécifiques.

Il est intéressant de comparer les besoins en longueur d’onde issus du sondage avec celles pour lesquelles des développements ont été lancés par le programme atomQtrl, marquées par une étoile dans la Figure 3 : 420 nm, 556 nm, 780 nm, 840 nm et 1013 nm. Si les longueurs d’onde liées au refroidissement du rubidium (780 nm) ou de l’ytterbium (556 nm) correspondent bien aux besoins exprimés par les sondés, celles liées au calcul quantique avec des atomes de Rydberg de rubidium (420 nm, 1013 nm et 840 nm) apparaissent comme moins plébiscitées. Cet écart provient certainement du fait que ce type d’applications fait principalement l’objet, en France, de développements au sein de *startups* comme Pasqal que dans la recherche publique. Le profil des personnes ayant répondu à ce sondage ne fait donc pas particulièrement apparaître ce besoin, pourtant identifié comme critique pour les applications au calcul quantique.

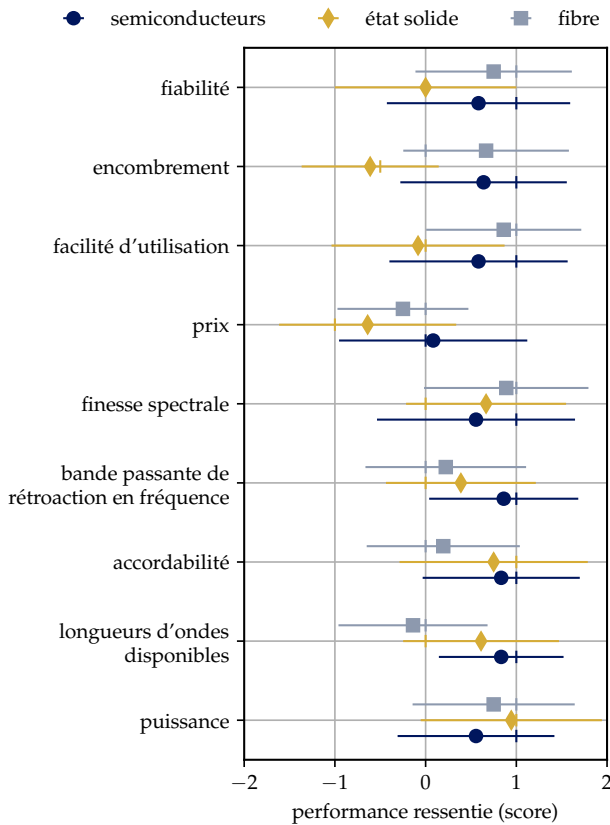
## Ressenti sur les différentes technologies laser

La série de questions suivante invitait les participants à donner leur avis sur les performances des trois principales familles de laser (semi-conducteurs, état solide, fibres) sur différents aspects. Pour chaque entrée, le participant était invité à noter les performances avec les options suivantes : very bad, rather bad, neutral, rather good, very good. Pour l’exploitation du sondage, nous avons associé à chaque réponse une valeur, distribuée linéairement de -2 à +2. Nous pouvons alors, pour chaque entrée, calculer la note moyenne ainsi que l’écart type. Les résultats sont reportés en Figure 4.

D’un point de vue général, la technologie semi-conducteurs est la mieux notée, et pêche principalement sur la question de la puissance et de la finesse spectrale. Les avantages et inconvénients connus des lasers à état solide apparaissent aussi : leur accordabilité et leur puissance sont bien notées, au contraire de leur encombrement, de leur prix et, peut-être plus étonnant, de leur fiabilité. Les lasers à fibre sont globalement au coude à coude avec les lasers semi-conducteurs, avec cependant un retard sur les questions de longueurs d’onde accessibles, d’accordabilité et de bande passante de rétroaction en fréquence. Point intéressant, le critère ayant reçu la note globale la plus négative est celui du prix, ce qui illustre bien que la question des développements laser ne se limite pas aux performances pures, mais touche aussi à des questions d’industrialisation, de volumes de production et de réduction des coûts.

## Critères importants lors de l’approvisionnement

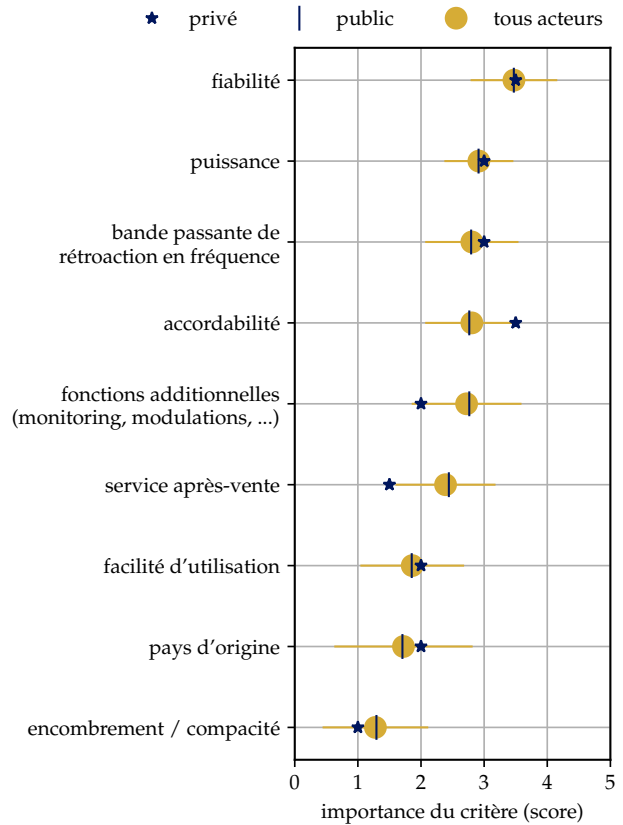
La section suivante portait sur l’importance relative de différents critères (fiabilité, puissance, pays d’origine, ...) pris en compte lors de l’approvisionnement



**Figure 4** – Évaluation des performances des systèmes lasers, classés suivant trois catégories principales (semi-conducteurs, état solide, fibres), suivant une série de critères. Pour chaque critère, la moyenne et l'écart type de la note sont reportés respectivement par un symbole plein et ses barres d'erreur. La médiane est quant à elle indiquée par un trait vertical. La méthode de calcul de la note à partir des réponses au sondage est présentée dans le corps de l'article.

d'un système laser. Comme pour la question précédente, différentes options étaient proposées pour chaque critère : not relevant, relevant but secondary, important, very important, top priority. Nous calculons ensuite un score en attribuant des notes, distribuées linéairement entre 0 et 4, à ces options. Les résultats sont présentés dans la Figure 5. Bien que le nombre de réponses émanant d'acteurs privés soit faible (2), nous avons jugé intéressant d'indiquer comment leur réponse se situait par rapport à la moyenne, principalement issue de la réponse d'acteurs de la recherche publique. Les moyennes respectives des secteurs privé et public sont donc reportées avec une étoile et une barre horizontale.

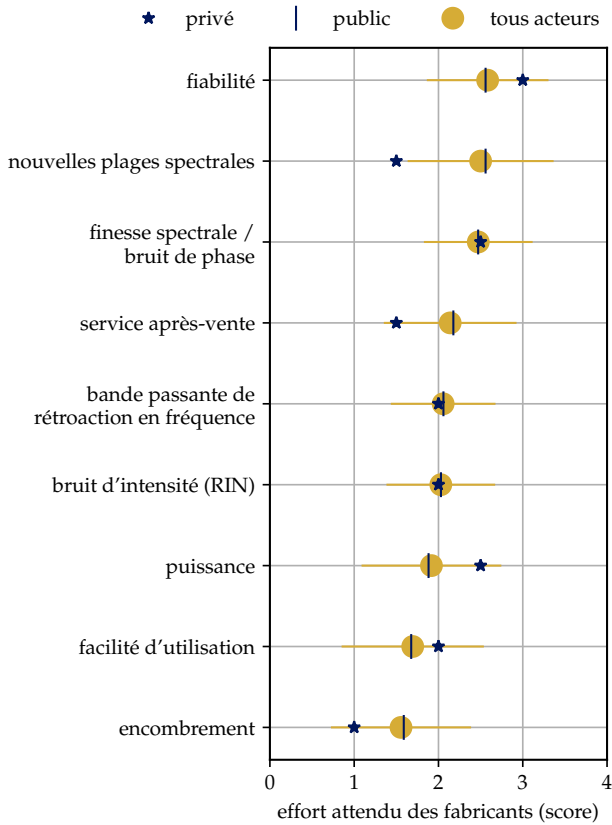
Le principal enseignement de cette question est que la fiabilité des systèmes est placée largement en tête, par l'ensemble des participants. Ce résultat est particulièrement intéressant, et souligne le fait que les systèmes laser ne sont pas jugés à l'aune de leurs performances pures, mais que la question de leur robustesse et de leur fiabilité est bien un critère central



**Figure 5** – Importance relative des critères considérés lors de l'approvisionnement d'un système laser. Pour chaque entrée, nous reportons la moyenne et l'écart type de l'ensemble des réponses. Les moyennes respectives des réponses des acteurs du privé et du public sont reportées avec une étoile et une barre horizontale.

de choix. La sécurisation de l'approvisionnement en laser ne doit donc pas uniquement passer par des développements ciblés sur des performances pures, mais aussi par des questions de durcissement industriel, d'identification des points de défaillance et de fiabilisation des systèmes.

Les critères venant ensuite concernent principalement les performances du laser, avec notamment la question de la puissance qui reste centrale pour ces applications. Les questions liées à la facilité d'utilisation ou à l'encombrement sont jugées relativement peu importantes, ce qui traduit l'utilisation de ces systèmes par des personnels experts et, probablement, un aspect encore assez secondaire des questions d'industrialisation des systèmes quantiques. On note enfin que la question du pays d'origine est jugée relativement peu importante, ce qui n'est pas très étonnant pour les acteurs de la recherche publique – et peut-être un peu plus pour les acteurs privés. Il est assez clair que les questions de préférence communautaire et de soutien à l'économie locale sont secondaires dans ce type d'achats, d'où la nécessité de programmes de soutien ciblés comme atomQtrl pour garder une industrie locale compétitive sur le



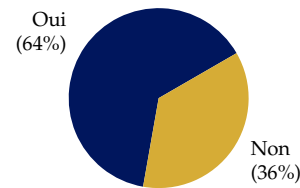
**Figure 6** – Efforts attendus de la part des participants pour les développements laser à venir. Pour chaque entrée, nous reportons la moyenne et l'écart type de l'ensemble des réponses. Les moyennes respectives des réponses des acteurs du privé et du public sont reportées avec une étoile et une barre horizontale.

marché global.

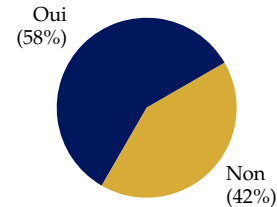
## Avis sur les développements à cibler

Nous demandions ensuite aux participants de noter l'importance relative de différents critères pour les développements à appuyer chez les fabricants de lasers. Quatre options étaient proposées pour noter l'importance des efforts à accorder à chaque entrée : no effort (already satisfying), low, medium, high. Comme pour les questions précédentes, nous avons attribué des scores distribués linéairement entre 0 et 4 pour ces réponses, afin de classer l'importance relative de chaque critère. Les résultats sont reportés en Figure 6. En cohérence avec les résultats de la question précédente, la question de la fiabilité des sources laser arrive en tête. La question de l'atteinte de nouvelles plages spectrales, ciblée dans le programme atomQtrl, arrive en second. De façon intéressante, les questions de puissance sont jugées moins prioritaires, alors que ce critère est jugé comme critique, ce qui semble indiquer que les solutions actuelles sont satisfaisantes sur ce point – on note que sur ce point la réponse des acteurs privés diffère significativement.

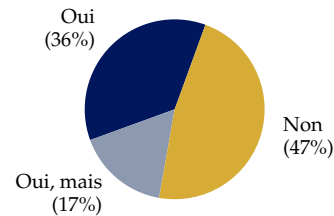
## Connaissance des lasers Français



## Utilisation des lasers Français



## Connaissance d'atomQtrl



**Figure 7** – Connaissance et utilisation de l'écosystème laser français, et du programme atomQtrl.

## Connaissance de l'écosystème

La dernière série de questions concernait l'écosystème laser français. Les résultats sont présentés en Figure 7. On note que les participants considèrent majoritairement (64%) connaître les produits proposés par les fabricants français, et qu'ils sont aussi majoritaires (58%) – quoique dans une moindre proportion – à en utiliser.

Les participants étaient ensuite invités à indiquer s'ils avaient connaissance du programme atomQtrl, avec trois réponses possibles : "Yes, and I know what this is about", "Yes, but I am not sure what this is about", et "No". Les résultats montrent qu'une majorité de participants ont entendu parler de cette initiative, mais que seulement un tiers estime savoir ce qu'elle recoupe. Les réponses à cette question incitent à une plus grande communication autour du programme, en particulier auprès des utilisateurs finaux.

## Conclusions

Les réponses au sondage initié dans le cadre du programme atomQtrl permettent d'éclairer les conditions d'utilisation des technologies laser pour les applications quantiques. Certains résultats étaient attendus, à l'image de la prééminence de l'utilisa-

tion du rubidium et des besoins liés en matière de longueurs d'onde. Le plus grand enseignement de cette étude est à nos yeux l'importance accordée aux questions de fiabilité des systèmes laser. Cette question, au coeur des problématiques d'industrialisation des technologies laser et – par extension – des technologies quantiques, est souvent un angle mort des programmes de développement scientifiques et technologiques. Il convient donc de continuer la réflexion impulsée par cette étude et d'accompagner les industriels pour la mise en place de programmes de durcissement et de fiabilisation, en parallèle des initiatives destinées à l'augmentation des performances laser "pures". Nous pensons que l'Institut d'Optique, opérateur du programme atomQtrl, de par son positionnement à l'interface entre la recherche fondamentale et l'industrie, avec une expertise croisée sur les technologies laser et leurs applications, constitue un vaisseau tout désigné pour cette mission.

## Remerciements

L'équipe opérationnelle d'atomQtrl tient à remercier chaleureusement l'ensemble des personnes ayant pris le temps de répondre au sondage pour leur contribution, qui a rendu ce travail possible. Elle remercie aussi les responsables du DIM QuanTip et des GDR Gaz Quantiques et TEQ pour avoir relayé le sondage.

## Liste des questions

1. You work in :

- a public research lab
- a private company
- other :

2. On which kind of system do you work ?

- neutral atoms
- ions
- molecules
- other :

3. Which atomic species do you use ?

- Rubidium
- Strontium
- Ytterbium
- Cesium
- other :

4. What kind of laser do you use ?

- Semi-conductors lasers
- Solid-state lasers
- Fiber lasers
- other :

5. What are the typical wavelengths you need ?

- Réponse libre

6. How many lasers do you need in your systems / experimental setups ?

- 1
- 2-5
- 5-10
- >10

7. What are the typical power ranges you need ?

- < 1mW
- 1mW - 100mW
- 100mW - 1W
- 1W - 10W
- 10W - 100W
- > 100W

8. Please rate each technology (semi-conductors lasers, solid-state lasers, fibered lasers) according to the following criteria (options : very bad, rather bad, neutral, rather good, very good) :

- available power
- available wavelengths
- frequency tuning range
- frequency feedback bandwidth
- linewidth / frequency stability
- price
- ease of use
- footprint
- reliability

9. What are the important criteria when you choose a laser (options : not relevant, relevant, but secondary, important, very important, top priority)

- output power
- tunability
- frequency feedback bandwidth
- footprint / compacity
- ease of use
- additional features
- after-sale service
- country of origin
- reliability

10. Any comment ?

11. How much effort do you think manufacturer should put on the following points (options : no effort, low, medium, high)

- increasing the power of existing sources
- improving intensity noise
- improving linewidth / phase noise
- improving frequency feedback bandwidth
- reaching new wavelengths
- improving ease of use
- reducing footprint
- improving reliability
- improving after-sale service

12. Any comment ?
13. Are you familiar with the products offered by the French laser ecosystem ?
  - yes
  - no
14. Are you using lasers from manufacturers based in France ?
  - yes
  - no
15. Why ?
16. Have you heard about the atomQtrl program ?
  - yes, but I am not sure what this is about
  - yes, and I know what this is about
  - no
17. Any final thought ?
18. Would you like to be contacted about this survey or the atomQtrl program ?