

NOM / PRENOM						
4 2 0 2 5	<i>Aganis Lilian</i>	E P R E U V E	Physique	C O N C O U R S	X	
	Lieu de passage : <i>ENS Saclay</i>		Maths		ENS	X
	Date de passage : <i>14/06</i>		SII		Mines	
	Durée de préparation : <i>1H</i>		Français/Philo		Centrale	
	Durée de passage : <i>50 45' !!</i>		LV1		CCINP	
	Calculatrice autorisée : oui / (non)		LV2		Petites Mines	
	Ordinateur fourni : oui / (non)		TPE / ADS X		TPE/EIVP	
	Si oui quel logiciel ? <i>/</i>		TP Phys/Chimie		Autres ?	
	TP SII					

Sujet : si vous faites un schéma, précisez s'il était fourni. Soyez le plus précis possible. En Français ou LV, donnez si possible le nom, la date, l'auteur du texte, la source, etc...

ADS : Technologies de récupération  
d'énergie solaire  
(article plus bas...)

- o J'ai aimé l'article et ma présentation
- o J'ai foiré les questions (fatigue => oubli des <sup>sons</sup>).
- o Un examinateur avait un "accent" aristotélique pire que dans les "clichés". Je ne comprenais pas ses propos. N'arrivait lui dire 4 fois que je ne comprenais pas j'ai essayé de esquiver des réponses. -c'était drôle...

TPE : Paniqué par l'ADS j'ai parlé vite, sorti quelques éléments. Ils étaient endormis et n'ont rien compris je crois...

Je ne sais pas s'ils ont bien cru que je n'avais pas falsifié mon TIPE . . .

o Questions d'explication . . . , ils ne m'avaient pas écouté  
aussi . . .

→ Mauvais passage . . .

o Ils m'ont fait sortir 5 min trop tôt . Désespéré  
je ne m'en suis aperçue que une fois sorti de l'ENS  
Je ferai peut-être réclamation . . . 5 min ce n'est pas  
rien , surtout lorsque l'examinatrice vous demande  
de répondre vite par manque de temps . . .

o Mauvais Jury .

commentaire : aides et comportement de l'examinatrice/teur, beaucoup d'aide ou personne  
utilitaire, quelles indications et sur quelles questions, questions de cours supplémentaires ?  
calculatrice autorisée ou pas, sujet ressenti facile ou pas, évaluation de la performance

Je ferai mieux la prochaine fois



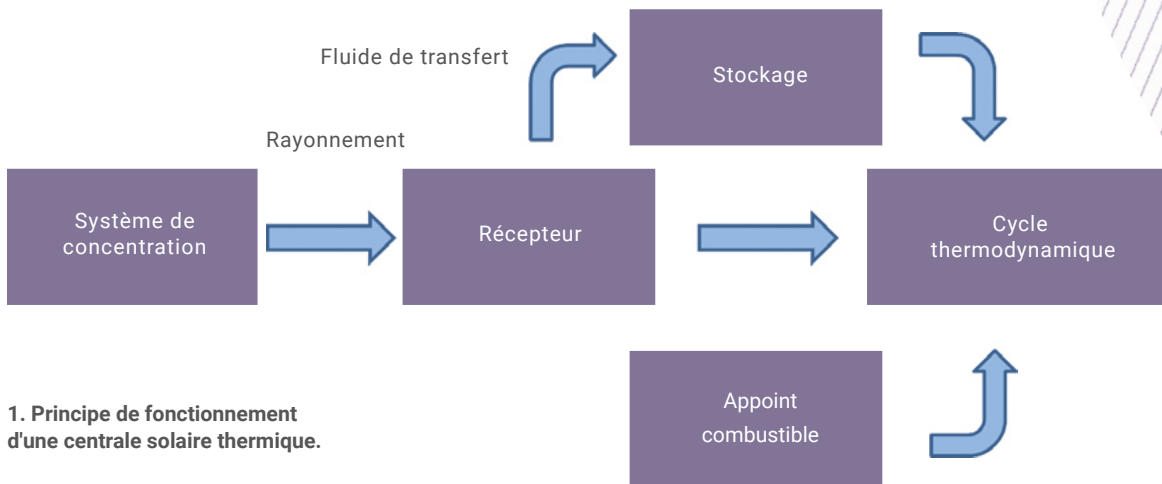
# L'autre technologie, le solaire à concentration

**Gilles Flamant** (gilles.flamant@promes.cnrs.fr)

Laboratoire Procédés, Matériaux et Énergie Solaire (PROMES, UPR 8521 CNRS)  
7 rue du four solaire, Odeillo, 66120 Font Romeu

Le solaire à concentration permet de chauffer à haute température un fluide caloporteur. Le chaleur obtenue peut être ou bien utilisée directement, ou bien convertie en énergie électrique en utilisant un cycle thermodynamique. Un avantage des centrales solaires est de pouvoir améliorer, grâce à un couplage avec des systèmes de stockage thermique, les possibilités de régulation de la production en fonction de la demande.

Dans cet article, les performances actuelles et les perspectives d'évolution de ces centrales sont rapidement présentées.



1. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermique.

## Principe et état de l'art

La concentration de la composante directe du rayonnement solaire permet de produire de la chaleur à haute température. Cette chaleur peut être utilisée soit directement dans un procédé industriel, soit pour générer de l'énergie mécanique ou des vecteurs chimiques d'énergie par des procédés thermochimiques. Dans le cas de la production d'électricité (fig. 1), l'énergie solaire est transférée à un fluide caloporteur

circulant dans un récepteur solaire. Un ensemble d'échangeurs permet ensuite à ce fluide caloporteur de céder sa chaleur à un fluide de travail qui convertit cette énergie thermique en énergie mécanique *via* un cycle thermodynamique. Cette chaleur peut également être stockée pour décaler la production vers les périodes de forte consommation (généralement le soir en Europe). Enfin, une génératrice couplée à ce cycle moteur produit de l'électricité. La seconde partie de cette chaîne de

conversion est identique à celle d'une centrale thermique classique mais la source d'énergie primaire est l'énergie solaire dans le cas des centrales solaires thermiques. En conséquence, une centrale solaire thermique peut être hybridée avec un appoint de combustible.

Les systèmes optiques mis en œuvre sont des miroirs produisant une concentration soit linéaire (concentrateurs cylindro-paraboliques et linéaires de Fresnel), soit ponctuelle

>>>

Thémis est un centre de recherche sur l'énergie solaire, situé dans la commune de Targasonne (Pyrénées-Orientales), dans une région où les conditions météorologiques (ensoleillement, altitude...) sont très favorables. Il est géré par le Conseil départemental des Pyrénées-Orientales.

Après le choc pétrolier de 1973, le gouvernement français décide en 1977 de développer l'utilisation de l'énergie solaire et d'implanter dans les Pyrénées-Orientales une centrale de conversion de cette énergie en électricité par concentration du rayonnement solaire. Construite par EDF et le CNRS, la centrale Thémis est inaugurée en 1983, mais la baisse du prix du pétrole conduit EDF à abandonner son financement en 1986. C'est en 2004 que le Conseil départemental des Pyrénées-Orientales décide de relancer la centrale solaire Thémis, dont l'électricité sera revendue à EDF, et de développer sur ce site un centre de recherche et de développement technologique sur la production d'énergie d'origine solaire. Les premiers kWh sont produits fin 2007.

Sur le site de 102 ha (fig. E1a) sont installés un champ de 200 héliostats (miroirs plans mobiles), qui suivent la course du soleil pour réfléchir son rayonnement et le concentrer vers le sommet d'une tour en béton de 101 m de haut (fig. E1b), un bâtiment accueillant des entreprises et des visites touristiques, et des bureaux.

Depuis 2014, l'installation est divisée en deux zones expérimentales. Dans la première zone, exploitée par le laboratoire PROMES du CNRS, 107 héliostats et la tour solaire alimentent la centrale solaire thermodynamique. La seconde zone, avec une centaine d'héliostats, est réservée à des projets innovants (dont l'opération Thémis-PV).



© Jeroen Komen (licence CC BY-SA-2.0).

**E1. La centrale solaire Thémis.**  
(a) Le site de Thémis en 2015.  
(b) Essais d'un récepteur solaire à particules fluidisées au sommet de la tour de Thémis.

### Fonctionnement de la centrale solaire à concentration

Les héliostats concentrent les rayons du soleil vers le sommet de la tour, qui héberge un récepteur solaire où circule un fluide caloporteur (au départ, des sels fondus à 350°C). Chauffé par les rayons, celui-ci transfère son énergie à un circuit d'eau. La vapeur alors formée actionne une turbine qui produit de l'électricité.

Dans le cadre du programme européen next-CSP (2016-2020), la centrale Thémis a été équipée d'une nouvelle turbine de 1,2 MW<sub>el</sub> et utilise des particules solides chauffées à 800°C (pour un meilleur rendement de conversion thermodynamique) comme fluide caloporteur et pour le stockage thermique.

### Projets

Le projet européen POLYPHEM a permis de prototyper les composants d'une centrale solaire à concentration à petite échelle, qui pourrait se révéler idéale pour les petites entreprises isolées ou les pays en développement.

La société Engie PV Thémis projette de construire sur le site de Thémis une centrale photovoltaïque, qui utilisera 80 des héliostats et produira annuellement plus de 800 MWh. Dans ce cadre, des projets portent sur l'utilisation de nouvelles cellules de silicium à base de couches minces ou microcristallines, et sur l'installation de systèmes de concentration de l'énergie lumineuse arrivant sur les cellules photovoltaïques.



© Xaviàteur (Wikipédia, CC BY-SA 3.0).

&gt;&gt;&gt;

(paraboloïdes et centrales à tour). Les facteurs de concentration correspondants sont de quelques dizaines à quelques milliers. Les fours solaires qui utilisent le principe de la double réflexion sont des outils de recherche.

Fin 2019, la puissance solaire thermodynamique installée dans le monde atteignait 6,3 GW pour une production de 16 TWh environ [1]. Plus de cent centrales solaires sont en fonctionnement, avec une puissance unitaire variant entre 1 et 280 MW. En Espagne, la puissance installée est de 2,3 GW ; c'est le pays qui a le plus développé cette technologie au stade commercial. Les autres pays qui sont équipés de telles centrales sont, en particulier, les États-Unis d'Amérique, le Maroc, l'Afrique du Sud, le Chili, certains États du Moyen-Orient (Dubai, Abu Dhabi...), l'Inde et la Chine. Depuis 2016, la Chine développe de nombreux projets de démonstration à partir de différentes technologies. En France, des recherches sont effectuées autour de la centrale solaire Thémis (encadré 1, p. 64).

Comme les systèmes de concentration ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, il est couramment admis que la ressource annuelle minimale nécessaire pour rentabiliser une centrale solaire est de 1800 à 2000 kWh/m<sup>2</sup>.an. En Europe, l'Espagne, le Portugal, la Grèce et certaines régions du sud de l'Italie et de la France répondent à ce critère. En revanche, pour la production de chaleur industrielle ce seuil peut être largement diminué, ce qui explique le développement de telles applications dans certains pays nordiques comme au Danemark.

## Capacité de stockage thermique à grande échelle, un atout

L'intégration d'un stockage thermique donne aux centrales solaires thermiques une qualité très appréciée des régulateurs de réseau : la possibilité de réguler la production en fonction de la demande (*dispatchability*). Le stockage permet d'augmenter le facteur de charge. Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie

qu'une centrale aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période. Généralement (sauf pour les centrales fonctionnant en pointe), l'énergie nécessaire pour charger le stockage est fournie en augmentant la surface de miroirs par rapport à la surface nécessaire pour la production à la puissance nominale. Le critère pour qualifier cette augmentation est dénommé le « multiple solaire ». Les valeurs classiques du multiple solaire sont comprises entre 1,5 et 2,5, ce qui correspond à une durée de stockage pour une production à pleine puissance de 6 à 15 heures. Les centrales qui possèdent un stockage de plus de 8 heures présentent généralement un facteur de charge situé dans la gamme 50-65 %. Les capacités de stockage installées atteignent plusieurs GWh.

## Rendement, cout et impact

Le rendement de conversion thermodynamique varie de 37 % à 42 % selon la technologie de concentration, car la concentration ponctuelle permet d'atteindre des températures de cycle de 550°C au lieu de 390°C pour les systèmes à concentration linéaire. Compte tenu des pertes optiques (concentrateur) et thermiques (récepteur), le rendement global nominal de conversion énergie solaire en électricité est de l'ordre de 20 %. Le rendement global moyen annuel est de 15 à 17 %. L'évolution de la technologie devrait permettre la mise en œuvre de cycles thermodynamiques ayant un rendement de 50 %.

Le cout actualisé de l'électricité produite par les centrales solaires thermiques a diminué de 47 % entre 2010 et 2019. La courbe d'apprentissage du solaire à concentration est très proche de celle du photovoltaïque [2, 3]. Dans le contexte des États-Unis, le cout actuel de l'électricité produite par une centrale à tour à sel fondu avec stockage est de 100 \$/MWh [4]. L'objectif affiché par le DOE (*US Department of Energy*) pour 2030 est de 50 \$/MWh pour les centrales produisant en base avec 12 heures de stockage, et de 100 \$/MWh pour les centrales conçues pour la production de pointe.

L'analyse du cycle de vie des centrales solaires cylindro-paraboliques et à tour montre que les émissions sont de 26-38 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh, soit dix fois moins qu'une centrale alimentée au gaz naturel. Le temps de retour énergétique est de 1 an environ [5].

## Futur

Les recherches actuelles portent en particulier sur l'accroissement de la température de fonctionnement des centrales (fig. E1b) [6] et sur la diminution du cout des composants comme le stockage thermique. La production de chaleur solaire (en 2014, l'industrie utilisait 32 % de la consommation énergétique mondiale et la chaleur représentait 74 % de la consommation énergétique industrielle) et d'hydrogène sont également des domaines de recherche et d'innovation très actifs. ■



- 1• IEA (2020), "Renewables 2020, Analysis and forecast to 2025", IEA, Paris. [https://cutt.ly/iea\\_renewable2020](https://cutt.ly/iea_renewable2020), License: CC BY 4.0.
- 2• IRENA (2020), "Renewable power generation costs in 2019", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-244-4.
- 3• J. Lilliestam et R. Pitz-Paál, "Concentrating solar power for less than USD 0.07 per kWh: finally the breakthrough?" *Renewable Energy Focus*, **26** (2018) 17-21.
- 4• C. Murphy *et al.*, "The Potential Role of Concentrating Solar Power within the Context of DOE's 2030 Solar Cost Targets", National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-6A20-71912 (2019).
- 5• J.J. Burkhart *et al.*, "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation", *Journal of Industrial Ecology*, **16** (2012) 93-109.
- 6• O. Behar *et al.*, (2020). "Design and performance evaluation of a modular solar power plant using a gas turbine combined cycle with fluidized particle-in-tube receiver and direct thermal storage", *Energy Conversion & Management*, **220** (2020) 11310.

# La chaleur solaire à basse température

**Bernard Tamain** (bernard.tamain@free.fr)

Commission Énergie et Environnement de la Société Française de Physique

L'article de G. Flamant (p. 63) traite de l'utilisation de l'énergie solaire pour transférer de la chaleur à haute température sur un fluide utilisé pour produire de l'électricité. Une autre utilisation du soleil consiste à tirer parti de la chaleur basse température qu'il accumule dans la terre, l'air ou l'eau. Elle peut être employée directement pour chauffer un fluide qui circule entre un panneau et un réservoir d'eau chauffée. De nombreux pays méditerranéens ont leurs toits truffés de telles installations pour produire une bonne partie de l'eau chaude sanitaire.

Les centrales thermiques solaires utilisent l'énergie du rayonnement solaire afin de produire de l'eau chaude centralisée, qui est ensuite distribuée aux consommateurs au moyen d'un réseau de chaleur (fig. 1). Actuellement, ces centrales représentent une part très marginale du marché du solaire thermique dans le monde.

On peut aussi récupérer la chaleur du sol pour chauffer une habitation par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur (PAC) : on parle alors abusivement de géothermie de surface, la géothermie profonde (la vraie) consistant à récupérer la chaleur accumulée en profondeur par la radioactivité de la terre. Cette technique des pompes à chaleur est aussi utilisée pour récupérer la chaleur de l'air ambiant afin de chauffer une habitation ou un ballon d'eau chaude (ballon thermodynamique). Ces installations qui fonctionnent à l'électricité sont caractérisées par un coefficient



de performance énergétique (COP), rapport entre l'énergie totale thermique fournie et la consommation électrique de la pompe : des valeurs typiques sont de 3 ou 4.

Les gisements de chaleur solaire accessibles sont grands et pourraient en principe chauffer de nombreux logements correctement isolés. Les limitations tiennent au coût de l'installation, à leur moindre efficacité en période de grand froid lorsque la chaleur est prélevée dans l'air, à la plus grande difficulté de mise en œuvre dans les zones densément construites (surfaces grandes nécessaires pour le géothermique de surface), et aux problèmes de voisinage que peut induire le bruit des compresseurs de pompe à chaleur en zones denses. Elles tiennent aussi au fait qu'en dépit de quelques possibilités d'aide publique aux PAC air-eau dans le résidentiel, l'essentiel des incitations se concentre sur le solaire photovoltaïque. ■

**1. Le parc solaire thermique Cellcius de Creutzwald, en Moselle, le plus grand de France, inauguré le 15 octobre 2020, est constitué de 379 panneaux capteurs plans de 16 m<sup>2</sup> en aluminium vitré, soit une surface de captage de plus de 6000 m<sup>2</sup>. Le liquide caloporteur est véhiculé à travers des alvéoles extrudées tout le long des panneaux. Au fond, on distingue la cuve tampon de 2000 m<sup>3</sup>, qui permet de stocker, sous forme d'eau chaude à 85°C, la chaleur produite en été par le parc solaire thermique. La production annuelle de la centrale s'élève à 2,7 GWh, ce qui correspond à l'équivalent des besoins en chaleur de 190 foyers. Source : Le Républicain Lorrain.**

“ Une autre utilisation du soleil consiste à tirer parti de la chaleur basse température qu'il accumule dans la terre, l'air ou l'eau. ”

NOM / PRENOM					
4 2 0 2 5	BELICARD Théodore	E P R E U V E	Physique	C O N C O U R S	X
	Lieu de passage : Saclay		Maths		ENS
	Date de passage : 18/06/2025		SII		Mines
			Français/Philo		Centrale
	Durée de préparation : 1h		LV1		CCINP
	Durée de passage : 45 min		LV2		Petites Mines
	Calculatrice autorisée : oui / non		TIPE		TPE/EIVP
	Ordinateur fourni : oui / non		TP Phys/Chimie		Autres ?
	Si oui quel logiciel ?		TP SII		

Sujet : si vous faites un schéma, précisez s'il était fourni. Soyez le plus précis possible. En Français ou LV, donnez si possible le nom, la date, l'auteur du texte, la source, etc...

ADS Article assez intéressant mais aucune physique vraiment expliquée.

Questions assez pointues sur :  
 • la couche limite  
 • le rayonnement (loi de Stefan)  
 • Les matériaux piézo-électriques  
 • La conductivité et la permittivité diélectrique

TIPE ☹ Aucune questions sur les incertitudes.

questions sur :

- ~~fait~~ Comment on s'est réparti le travail en binôme
- Diverses possibilités de détection :
  - coexistence phase / vide
  - fausse pièce
- Si j'avais qu'été de la théorie  
 => j'avais une annexe dessus donc c'était parfait

Jury: 2 types plutôt sympas et intéressés,  
n'ont posé que des questions de physique  
qui étaient compliquées mais pertinentes.

Commentaire : aides et comportement de l'examinatrice/teur, beaucoup d'aide ou personne mutique, quelles indications et sur quelles questions, questions de cours supplémentaires ? Calculatrice autorisée ou pas, sujet ressenti facile ou pas, évaluation de la performance

# Le psychromètre :

## l'instrument qui a défié la physique du 19<sup>e</sup> siècle

Frédéric Restagno et François Boulogne (francois.boulogne@universite-paris-saclay.fr)

Laboratoire de Physique des Solides (Université Paris-Saclay et CNRS UMR 8502)

1 rue Nicolas Appert, Bâtiment 510, 91405 Orsay Cedex

La mesure de l'humidité de l'air a été un défi tout au long des siècles, mais, de nos jours, les capteurs électroniques sont largement utilisés.

Cette prédominance actuelle tend à reléguer au second plan un instrument qui a captivé les scientifiques pendant près d'un siècle et demi : le psychromètre.

### L'hygrométrie au cours des âges

Au fil de l'histoire, la mesure de l'humidité de l'air a représenté un défi, et un large éventail de techniques ont été inventées, dont la liste exhaustive dépasse largement cet article. Les premières approches consistaient à employer des matériaux hygroscopiques, c'est-à-dire adsorbant ou libérant de l'eau pour atteindre un équilibre thermodynamique avec la teneur en eau de l'atmosphère, et à procéder à la mesure par pesée. Bien qu'il soit difficile d'attribuer l'invention de ce concept, on trouve plusieurs références à partir du quinzième siècle utilisant divers matériaux tels que la laine, le coton, les sels hygroscopiques et les éponges. Léonard de Vinci a illustré ce principe dans ses carnets, avec une balance à plateaux et du coton (*Codex Atlanticus*, 1478).

Au dix-septième siècle, des approches alternatives ont été réalisées en considérant les propriétés mécaniques des matériaux hygroscopiques. En effet, certains matériaux anisotropes

peuvent se dilater, s'enrouler ou se tordre en fonction de leur teneur en eau. Par exemple, Coniers utilisait l'expansion latérale du bois avec l'humidité, et Hooke a tiré profit de l'enroulement de fibres naturelles obtenues à partir de parois d'intestins d'animaux, de boyaux de chats, ou de plantes comme l'avoine et l'herbe à musc. Des appareils plus célèbres sont apparus à la fin du dix-huitième siècle. Ainsi, De Luc a proposé d'utiliser la dilatation de l'ivoire et, plus tard, des os de baleine. Enfin, la variation de longueur avec l'humidité de cheveux humains placés sous tension est le principe de l'hygromètre de Saussure, largement répandu. Ces hygromètres de De Luc et Saussure représentent un aboutissement de l'approche hygroscopique de l'époque, mais ont une précision limitée.

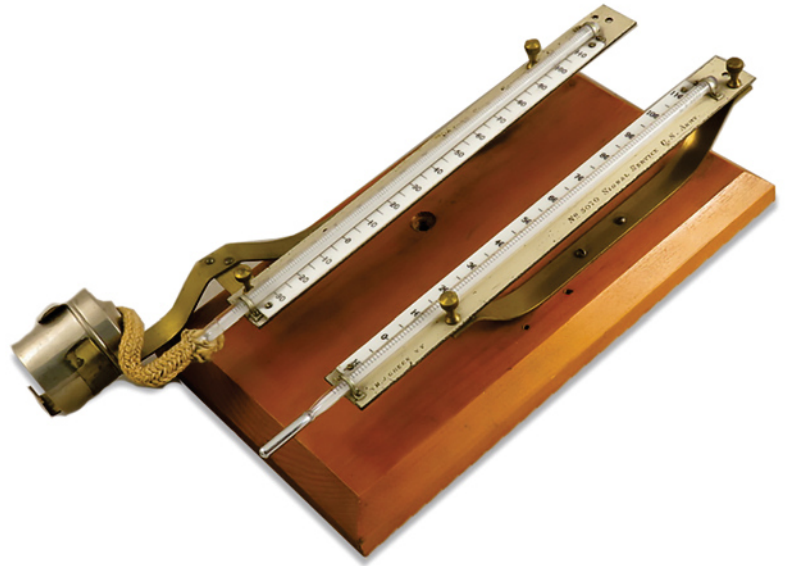
### Les phénomènes hors équilibre : une nouvelle approche

Un nouvel élan apparaît avec la thermodynamique hors équilibre, dont fait partie le phénomène de condensation. Le principe est de

refroidir une surface en contact avec l'air, et dont on mesure la température. L'opérateur relève la température à laquelle la première goutte obtenue par condensation apparaît. Les premiers développements ont été faits dans les années 1660, où le principal défi à cette époque était le refroidissement. Daniell a utilisé en 1820 la vaporisation de l'éther, ce qui a donné naissance au célèbre hygromètre éponyme. Quelques décennies plus tard, le chimiste et physicien français Henri Victor Regnault [1] reconnaît la grande précision de cet appareil, mais aussi les difficultés à effectuer la mesure en raison de manipulations complexes, ce qui empêche une large utilisation en dehors des laboratoires scientifiques.

Le dix-neuvième siècle est également marqué par l'usage d'un autre phénomène hors équilibre, l'évaporation d'un liquide, qui est associée à un effet de refroidissement dû à l'enthalpie de vaporisation. L'utilisation de cette différence de température est appelée « psychrométrie » et s'est développée jusqu'au milieu du vingtième siècle.

“ En 1792, James Hutton, géologue et chimiste, observe qu’un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide [...] indique une température plus basse qu’un thermomètre sec, ce qu’il met en relation avec l’humidité de l’atmosphère.”



**Psychromètre à bulbe humide de l’armée américaine (1868).** Le bulbe du thermomètre de gauche est recouvert d’un tissu plongeant dans un réservoir rempli d’eau. Ce bulbe est ainsi humidifié par capillarité, tandis que le thermomètre de droite a un bulbe sec. National Museum of American History [Libre de droit pour utilisation non commerciale. <https://americanhistory.si.edu/collections/rights-and-reproductions>]

## La naissance du psychromètre

En 1792, James Hutton, géologue et chimiste, observe qu’un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide (par exemple, avec un tissu imbibé d’eau) indique une température plus basse qu’un thermomètre sec, ce qu’il met en relation avec l’humidité de l’atmosphère [2, 3]. Une vingtaine d’années plus tard, John Leslie, intéressé par les mesures de chaleur et d’humidité, a étudié la différence de température entre les bulbes sec et humide. Étudiant par ailleurs les phénomènes liés à la capillarité, Leslie [4] a proposé un dispositif utilisant une ficelle afin d’alimenter constamment le bulbe humide en eau à partir d’un réservoir par succion capillaire. Il a rapporté des mesures relatives à la différence de température et au point de rosée, et a remarqué judicieusement que les températures mesurées dépendent de l’écoulement de l’air ambiant.

Assez rapidement, les physiciens cherchent à rationaliser le principe de cet instrument. D’ailleurs, on doit le nom « psychromètre » à E.F. August, qui propose en 1825 l’usage d’une

étymologie grecque construite sur les mots psuchron (froid) et metron (moyen de mesure). Ce terme est adopté par la communauté scientifique. La différence de température entre le bulbe sec et le bulbe humide étant reliée à la différence de pression de vapeur par un coefficient psychrométrique, le défi était de comprendre et de prédire ce coefficient.

Ivory [2], August [5], puis Apjohn [6] tentent d’élaborer des modèles pour lier la différence de température au point de rosée. Maxwell et Arnold qualifieront ces modèles de *théorie de la convection*, terminologie qui est différente du sens moderne. « Convection » signifie ici qu’un élément de volume d’air est transporté de manière *ad hoc* pour être mis en contact avec le bulbe humide, là où la transformation thermodynamique s’opère. Ces modèles permettent essentiellement de comprendre que la chaleur nécessaire à l’évaporation induit une baisse de température. Ainsi, le coefficient psychrométrique dépend de l’enthalpie de vaporisation de l’eau et de la capacité thermique de l’air.

Néanmoins, de nouvelles observations ont rapidement montré les limites de ces modèles. En effet, le physicien italien Giuseppe Belli publie en 1930 un *Corso Elementare Di Fisica Sperimentale*, dont un volume traite du transfert de chaleur. À partir de mesures minutieuses, Belli comprend que la différence de température dépend de la taille du bulbe humide, de la vitesse de l’air et des effets radiatifs, en plus de la teneur en eau présente dans l’air. Ce travail élucide les paramètres clés de l’instrument, mais pas encore les subtilités du mécanisme physique.

Inspiré par les travaux de Leslie, James Pollard Espy propose en 1834 de faire tourner le psychromètre pour imposer la vitesse de l’air, et de cette façon obtenir des mesures plus fiables [7]. C’est ainsi que le psychromètre à fronde, ressemblant à une crécelle, se développe.

En 1887, Assmann a relancé l’utilisation des psychromètres en météorologie, en leur apportant deux améliorations : protéger les bulbes avec un écran argenté pour minimiser les radiations, et imposer le flux d’air au moyen d’un ventilateur électrique aspirant l’air le long des thermomètres.

&gt;&gt;&gt;

## Un défi théorique

Bien que les paramètres régissant le psychromètre soient connus, il n'en reste pas moins que la description théorique a longtemps résisté à la physique.

Malgré ses importants efforts pour collecter des mesures dans diverses situations et pour améliorer la théorie de la convection d'August [5], Regnault a déclaré que les tentatives de rationalisation des mesures des psychromètres étaient vaines et que le psychromètre doit être considéré comme un instrument empirique, analogue à l'hygromètre de Saussure [1]. Regnault avait une préférence pour la mesure du point de rosée, bien que la manipulation soit plus délicate.

Une contribution majeure qui fera date dans l'étude de l'évaporation provient de James Clerk Maxwell dans un article intitulé "Diffusion" [8]. L'évaporation est décrite par un processus de diffusion de la vapeur dans l'air, qui s'oppose aux théories convectives établies jusqu'alors. Conscient des effets du rayonnement sur le psychromètre, Maxwell rédigea une théorie incluant un flux radiatif, la diffusion de la chaleur et de la masse. Néanmoins, ce modèle ne permet pas de rendre compte des effets de la vitesse de l'air.

Une description théorique plus juste du psychromètre est devenue possible au début du vingtième siècle. Maxwell a décrit le flux radiatif comme étant proportionnel à la surface et à la différence de température. De nos jours, nous savons cependant que cette dernière affirmation est incorrecte. En effet, l'équation décrivant le rayonnement d'un corps noir avec sa température  $T$  a été établie empiriquement par Josef Stefan en 1879 [9] et théoriquement par Ludwig Boltzmann en 1884, montrant que la puissance totale rayonnée est proportionnelle à  $T^4$ .

En 1933, J. Howard Arnold publie un article intitulé "The theory of the psychrometer" [10], regroupant la théorie dite de conduction de Maxwell et la théorie de la convection d'August, ainsi que l'équation de Stefan-Boltzmann. Grâce aux travaux de Reynolds, il parvient à introduire le rôle de la vitesse de l'air. Pour appuyer ses prédictions, Arnold a réalisé des expériences dans une soufflerie non

seulement avec de l'eau, mais aussi avec du toluène, du chlorobenzène et du xylène.

La description moderne du transfert de chaleur et de masse sous flux d'air s'effectue avec la théorie de la couche limite. Cette dernière émergera lentement à partir de 1904 avec les travaux pionniers de Prandtl et Blasius, qui semblent être méconnus d'Arnold, sans doute parce que la théorie de la couche limite a mis du temps pour être reconnue par les pairs.

Pour résumer le principe, un psychromètre fonctionne en régime permanent, ce qui signifie que l'énergie nécessaire à la vaporisation du liquide est équilibrée à la fois par la diffusion thermique et par le rayonnement. En soufflant de l'air sur le psychromètre, on obtient une diminution de la différence de température jusqu'à une certaine vitesse caractéristique de l'air. En effet, l'évaporation et la diffusion thermique augmentent avec la vitesse de l'air en raison de l'apparition d'une couche limite à travers laquelle les transferts s'effectuent. Cependant, le flux d'air n'a aucun effet sur le processus radiatif. Ainsi, le flux d'air tend à diminuer la contribution relative du rayonnement dans le bilan énergétique, jusqu'au point où il peut être négligé. En outre, la conduction thermique et le flux d'évaporation varient de la même manière en fonction de la vitesse de l'air, et s'annulent au-dessus d'une vitesse caractéristique. Par conséquent, pour obtenir les mesures les plus fiables, les psychromètres sont ventilés de manière à ce que la différence de température devienne indépendante de la vitesse de l'air. Ainsi, la différence de température peut être reliée à l'humidité relative, et ce de manière indépendante de la vitesse de l'air.

La relation n'est cependant pas simple. D'un point de vue plus pragmatique, la lecture de tableaux ou le calcul d'équations empiriques étant peu pratique et chronophages, l'ingénieur américain Willis H. Carrier [11] a développé un diagramme psychrométrique pour mettre en relation les températures des bulbes sec et humide, et l'humidité relative (voir l'encadré, p. 31).

## Une lente perte d'intérêt...

L'intérêt pour la description théorique des psychromètres a commencé à décroître au milieu du vingtième siècle, comme en témoigne le faible nombre de citations des travaux d'Arnold, alors qu'on venait enfin d'en rationaliser tous les principes physiques. Néanmoins, la physique sous-jacente au psychromètre présentait toujours un intérêt pour les recherches consacrées à l'évaporation des gouttes en suspension.

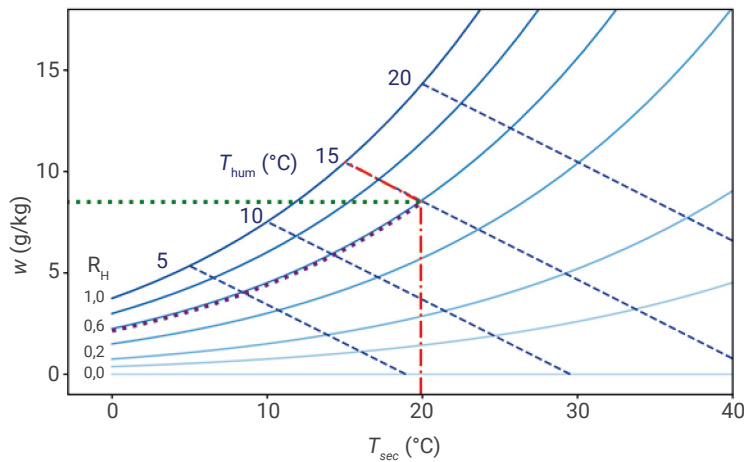
En 1938, N. Frössling a réalisé une analyse expérimentale et théorique poussée de l'évaporation de gouttes placées à l'extrémité d'une aiguille et plongées dans un flux d'air généré par un ventilateur [12]. Frössling a calculé les transferts de chaleur et de masse avec une approche moderne établie à partir de la couche limite de Prandtl, et a également considéré le rôle du rayonnement de Stefan-Boltzmann. Ce travail a mis en relation le taux d'évaporation, qui dépend de l'humidité relative, avec la température de la goutte ainsi que la vitesse de l'air. Bien que le psychromètre soit mentionné comme moyen de comparaison pour la température de la goutte mesurée, les références historiques sur le développement de la psychrométrie citées ci-dessus n'apparaissent pas dans l'ouvrage de Frössling.

À partir de la deuxième moitié du vingtième siècle, d'autres études sur l'évaporation des gouttes, notamment par Ranz et Marshall, Downing, Beard et Pruppacher, sont publiées sans liens avec le psychromètre, à l'exception de l'ouvrage de N.A. Fuchs sur l'évaporation des gouttes paru en 1959.

Le vingtième siècle est associé à l'émergence de l'électronique, et les capteurs d'humidité ont bénéficié de ces développements. En 1938, F.W. Dunmore invente un capteur à résistance composé d'un chlorure de lithium, élément hygroscopique. L'avantage revendiqué par Dunmore est une réponse plus rapide aux variations d'humidité, ce qui est notamment crucial pour les mesures météorologiques effectuées avec des ballons atmosphériques.

Aujourd'hui, les capteurs d'humidité utilisent différentes technologies, qui s'appuient sur la variation d'une

## ➔ DIAGRAMME DE CARRIER



**E1. Diagramme de Carrier.** Les courbes sont tracées pour des valeurs données de l'humidité relative  $R_H$  qui croisent les droites bleues en pointillés indiquant la température du bulbe humide. Ainsi, si la température ambiante  $T_{sec}$  est de 20 °C et que le bulbe humide est à 15 °C, l'intersection des deux lignes en tirets rouges conduit en un point permettant de lire une humidité relative  $R_H$  de 60 % et une humidité spécifique  $w$  de 8,5 g/kg.

Ce diagramme est utilisé pour mesurer l'humidité, mais aussi pour déterminer les variations physiques au cours des processus thermodynamiques. Carrier est ainsi reconnu comme le précurseur de l'ingénierie du traitement de l'air.

L'équation psychrométrique n'ayant pas de solution analytique, la conversion d'une mesure de températures sèche et humide en humidité relative est fastidieuse et a nécessité le recours à des tables.

Afin d'obtenir une résolution graphique de l'équation psychrométrique, l'ingénieur américain W.H. Carrier a mis au point en 1904 un diagramme représentant l'humidité spécifique  $w$ , c'est-à-dire la masse d'eau par unité de masse d'air, en fonction de la température du bulbe sec (fig. E1).

Ce diagramme permet également de visualiser les changements de propriétés de l'air lors de transformations isobares. Cet usage est utile à l'ingénierie du traitement de l'air, s'appliquant notamment aux domaines de l'agriculture, de l'agroalimentaire, de l'aéronautique et de la météorologie.

propriété de différents matériaux suite à l'absorption de vapeur. Les propriétés courantes sont la conductivité électrique, la permittivité diélectrique, l'indice de réfraction optique, la flexion mesurée par une piézorésistance, ou encore la variation de poids déterminée à partir du décalage de la fréquence de résonance. Cependant, les psychromètres ont encore leur place dans ces hautes technologies, puisqu'ils sont utilisés pour calibrer les capteurs électroniques et font office de standard pour l'Organisation météorologique mondiale.

À travers cette brève histoire du psychromètre, nous avons remarqué

que les paramètres pertinents, en particulier le rôle de la ventilation, ont été découverts très tôt à partir d'investigations expérimentales. Néanmoins, la compréhension du coefficient psychrométrique a été limitée pendant plus d'un siècle, en raison de l'absence de deux concepts majeurs : l'équation de Stefan-Boltzmann et la théorie de la couche limite. Aujourd'hui, le psychromètre possède un atout, celui d'être simple de conception et de fabrication, ainsi que d'être réparable et durable. Ceci en fait un instrument *low-tech* de choix qui pourrait le remettre sur le devant de la scène. ■



1• H.V. Regnault, « Études sur l'hygrométrie », *Ann. Chim. Phys.* **37** (1853) 257 ; *Études sur l'hygrométrie* (1845), Bachelier (Paris).

2• J. Ivory, "XVI. On the hygrometer by evaporation", *Philos. Mag.* **60** (1822) 81–88. <https://doi.org/10.1080/14786442208652797>

3• J. Playfair, "Biographical Account of the late Dr James Hutton, F. R. S. Edin", *Earth Environ. Sci. Trans. Royal Society of Edinburgh*, **88** (1997) 39–99. <https://doi.org/10.1017/S0263593300090039>

4• J. Leslie, *A Short Account of Experiments and Instruments, Depending on the Relations of Air to Heat and Moisture*, W. Blackwood (1813).

5• E.F. August, "Ueber die verdunstungskälte und deren anwendung auf hygrometrie", *Annalen der Physik* **81** (1825) 69–88.

6• J. Apjohn, "On the Theory of the Moist-Bulb Hygrometer", *The Transactions of the Royal Irish Academy* **17** (1831) 275-282.

7• J.P. Espy, "On the dew-point hygrometer in connexion with the web bulb thermometer", *Journal of the Franklin Institute* **17** (1834) 81–85. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(34\)90086-7](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(34)90086-7)

8• J.C. Maxwell, *Diffusion, collected scientific papers*, Encyclopedia Britannica, Cambridge (1877).

9• J. Stefan, "Ueber die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Sitzungsberichte der Kaiserlichen", *Akademie der Wissenschaften in Wien*, **79** (1879) 391–428.

10• J.H. Arnold, "The Theory of the Psychrometer. II. The Effect of Velocity", *J. Appl. Phys.* **4**, (1933) 334-340. <https://doi.org/10.1063/1.1745202>

11• W.H. Carrier, "Rational psychrometric formulae", *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* **33** (1911) 1005.

12• N. Frössling, "Ueber die Verdunstung fallender Tropfen", *Gerlands Beitr. Geophys.* **52** (1938) 170216.

NOM / PRENOM					
Ψ 2 0 2 5	Lieu de passage : Paris Saclay	E P R E U V E	Physique	C O N C O U R S	X
	Date de passage : 12/06/2025		Maths		ENS
	Durée de préparation : 1h		SII		Mines
	Durée de passage : 45 min		Français/Philo		Centrale
	Calculatrice autorisée : oui / non		LV1		CCINP
	Ordinateur fourni : oui / non		LV2		Petites Mines
	Si oui quel logiciel ?		TIPE		TPE/EIVP
			TP Phys/Chimie		Autres ?
	TP SII				

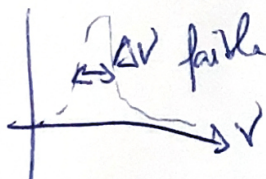
Sujet : si vous faites un schéma, précisez s'il était fourni. Soyez le plus précis possible. En Français ou LV, donnez si possible le nom, la date, l'auteur du texte, la source, etc...

ADS sur quantique et physique ultrarapide.

↳ intéressant, physique quantique donc pas trop de programme  
j'ai essayé de dvp les pts suivants:

- probabilité avec densité probabiliste  $\propto e^{-\frac{mgz}{k_B T}}$   $\xrightarrow{z \pm \delta z}$   
 $\xrightarrow{z}$

- Laser cherche à avoir



→ Comment photon sont émis AN: pour  $\lambda \leq 600 \text{ nm}$

- Intriqué avec le peu de chose que je savais sur les travaux d'Alain Aspect.

Questions:

- On veut capturer/observer le ~~de~~ flash lumineux d'un photon qui se désintègre, n'est-ce pas contradictoire d'utiliser un laser (lumineux) ?  
→ J'ai supposé que non, car on connaît le  $\lambda$  précisément, pas sur de celle-ci

- Qdq qu'est-ce sur le laser mais plutôt proche du cours

TIRE: Jerry plutôt attendu, a beaucoup insisté sur les incertitudes, j'étais sûr de mes trucs mais il était pas convaincu...

⇒ Jerry neutre, pas entraînant DUKIS pas plombant pour autant.

Commentaire : aides et comportement de l'examinatrice/teur, beaucoup d'aide ou personne mutique, quelles indications et sur quelles questions, questions de cours supplémentaires ? Calculatrice autorisée ou pas, sujet ressenti facile ou pas, évaluation de la performance

NOM / PRENOM							
Ψ 2 0 2 5		E P R E U V E	Physique		C O N C O U R S	X	
	Lieu de passage : Paris Saclay		Maths			ENS	X
	Date de passage : 12/06/2025		SII			Mines	
			Français/Philo			Centrale	
	Durée de préparation : 1h		LV1			CCINP	
	Durée de passage : 45 min		LV2			Petites Mines	
	Calculatrice autorisée : oui / <del>non</del>		TIPE	X		TPE/EIVP	
	Ordinateur fourni : oui / <del>non</del>		TP Phys/Chimie			Autres ?	
	Si oui quel logiciel ?		TP SII				

Sujet : si vous faites un schéma, précisez s'il était fourni. Soyez le plus précis possible. En Français ou LV, donnez si possible le nom, la date, l'auteur du texte, la source, etc...

ADS : Des pinces optiques pour piéger des atomes un par un ...

Antoine Browaeys.

Un examinateur souriant, l'autre plus ferme.

→ Questions sur le texte

→ 1 question hors texte

Comment peut-on observer la loi de Hans et de Keldysh avec ce système?

• Prestation oral plutôt bonne

• Questions difficiles à répondre.

L'article de mon sujet.

[https://stm.cairn.info/magazine-pour-la-science-2025-2-page-80?site\\_lang=fr](https://stm.cairn.info/magazine-pour-la-science-2025-2-page-80?site_lang=fr)

<https://doi.org/10.3917/pls.568.0080>

Je n'ai pas trouvé de pdf, peut être au CDI ?

Jury :

Un physicien qui parlait peu et un SIste (présumé) aigri qui me pressait quand il fallait installer mes feuilles ou partir.

Questions :

(SI)

Il voulait que j'explique le lien entre  $e_c$  et  $T$  j'ai parlé d'états des molécules avec le facteur de Boltzman

Dimension et valeur de  $k_B$

En fait il voulait me faire dire  $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$

(SI)

Pourquoi l'eau en se vaporisant fait baisser la température

(SI)

Pourquoi on a besoin de 2 thermomètres pour l'instrument

(φ)

Comment une capacité peut varier avec une absorption d'eau (j'ai sortie formule condo plan pour exemple)

Comment s'appelle  $\epsilon$

(φ)

Pourquoi quand il fait humide on ressent plus la chaleur

NOM / PRENOM							
4 2 0 2 5	ORDUNA Mael	E P R E U V E	Physique	C O N C O U R S	X		
	Lieu de passage : Paris Saclay		Maths		ENS	X	
	Date de passage : 12/06/2025		SII		Mines		
			Français/Philo		Centrale		
	Durée de préparation : 1h		LV1		CCINP		
	Durée de passage : 20min + 25min		LV2		Petites Mines		
	Calculatrice autorisée : oui / <u>non</u>		TIPE		X	TPE/EIVP	
	Ordinateur fourni : oui / <u>non</u>		TP Phys/Chimie			Autres ?	
Si oui quel logiciel ?	TP SII						

Sujet : si vous faites un schéma, précisez s'il était fourni. Soyez le plus précis possible. En Français ou LV, donnez si possible le nom, la date, l'auteur du texte, la source, etc...

« Des pinces optiques pour piéger des atomes un par un »  
Antoine Browaeys

Article avec quasiment rien au programme

Examineurs assez peu expressifs

- quelques questions sur le texte :

ils m'ont proposé et fait étudier un modèle  
non présent dans le texte pour expliquer certaines parties

TIPE : Questions assez pointues - questions sur la fiabilité  
des logiciels utilisés

# Des pinces optiques pour piéger des atomes un par un...

Antoine Browaeys (antoine.browaeys@institutoptique.fr)

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, 2 avenue Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau Cedex

Depuis une quinzaine d'années, les physiciens ont développé des techniques de manipulations d'atomes par laser qui permettent de refroidir, de piéger et d'observer un seul atome à la fois. Le piégeage d'atomes individuels se fait à l'aide d'une pince optique, terme qui désigne un laser focalisé sur une tache d'un micromètre de taille, au foyer duquel se trouve piégé l'atome.

Grâce à des méthodes holographiques il est aussi possible de produire des matrices de pinces optiques dont la géométrie est pratiquement arbitraire. On obtient ainsi des plans d'atomes séparés de quelques micromètres, arrangés selon des géométries variées. Au-delà de leur aspect esthétique, ces méthodes trouvent leurs applications dans le domaine en pleine expansion des technologies quantiques.

En 1955, Erwin Schrödinger, l'un des fondateurs de la physique quantique, affirmait : « Nous ne faisons jamais d'expérience avec une seule particule... Dans des expériences de pensée, nous le faisons parfois, mais cela conduit invariablement à des conséquences ridicules » [1]. Moins de 20 ans plus tard, Hans Dehmelt démontrait le piégeage d'un seul électron en utilisant des champs électriques et magnétiques [2]. Dehmelt avait une idée simple en tête : en isolant un seul électron, on peut faire des mesures sur ses propriétés sans que celles-ci soient modifiées par d'autres électrons environnants. On accède ainsi à ses propriétés intrinsèques. Par ailleurs, puisque la particule est piégée, on peut faire la mesure pendant longtemps, ce qui augmente sa précision. Dehmelt parvint ainsi à mesurer le moment magnétique de l'électron avec une précision de onze chiffres significatifs, fournissant un test très poussé de l'électrodynamique quantique qui prévoit sa valeur.

Les physiciens se sont ensuite attachés à élargir le nombre et le type de particules que l'on peut piéger avec des champs électromagnétiques. En 1980, H. Dehmelt et P. Toschek piégèrent ainsi un seul ion baryum. Mais le piégeage des atomes est beaucoup plus ardu que celui des ions. Les atomes sont neutres et, par conséquent, très peu sensibles aux champs électriques et magnétiques. Pour les ions, quelques volts sur une électrode suffisent à produire des pièges dont la profondeur est de quelques 10 000 K ( $\sim 1$  eV) : cela signifie que des ions qui possèdent une énergie cinétique résiduelle correspondant à la température ambiante (300 K) peuvent y rester confinés. Pour les atomes, comme nous allons le voir, les pièges que l'on sait créer au laboratoire à partir de faisceaux laser ont des profondeurs de seulement quelques millikelvins ! Pour y piéger un atome,

il faut donc que celui-ci soit issu d'un gaz refroidi à une température au moins aussi basse ! Ce défi a été relevé au cours des années 1980 – 1990 grâce aux méthodes de refroidissement d'atomes par laser [3]. Ces techniques, que nous ne détaillerons pas ici, permettent de refroidir un gaz d'atomes (par exemple des atomes alcalins, tels que le sodium, le rubidium ou le césium) initialement proche de la température ambiante (entre 300 et 500 K), jusqu'à des températures inférieures à 100 microkelvins ! Ces développements spectaculaires ont valu à W.D. Phillips, C. Cohen-Tannoudji et S. Chu le prix Nobel de physique en 1997 [4].

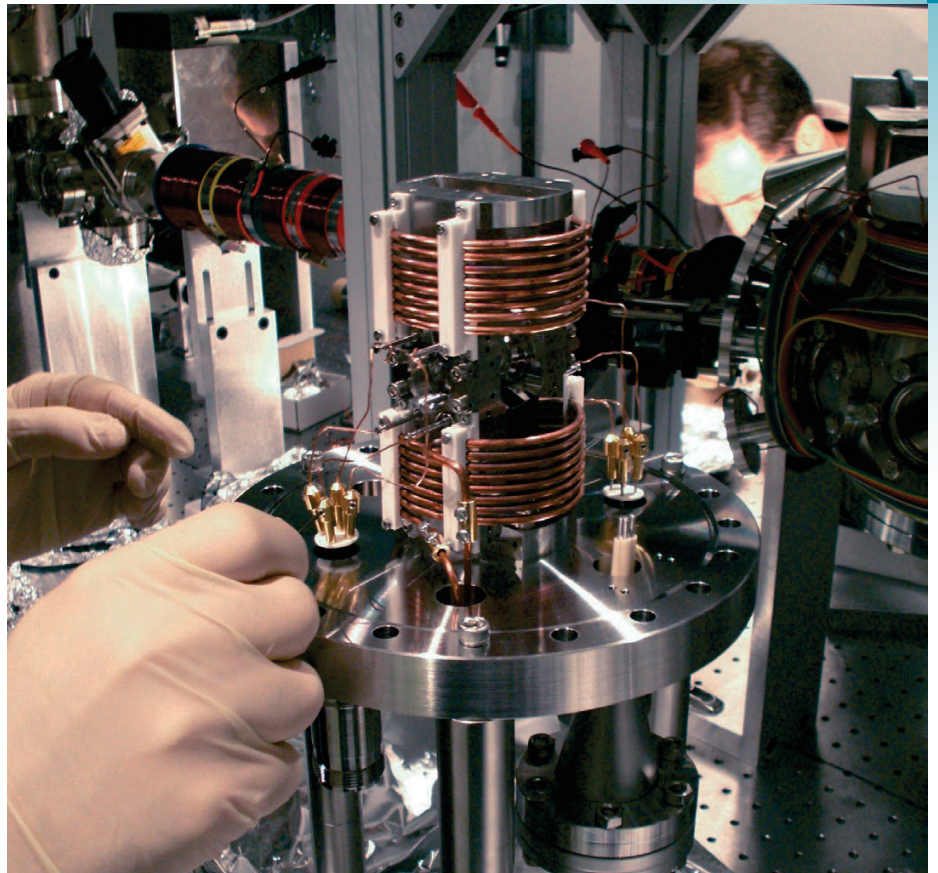
## Principe de la pince optique

Parmi le nombre considérable de travaux que le refroidissement d'atomes par laser a permis, il y a donc le piégeage optique d'atomes. Le principe peut en être compris par le modèle classique suivant. Le champ électrique  $E$  du laser polarise l'atome en séparant le barycentre des électrons de celui du noyau qui reste essentiellement immobile, car beaucoup plus lourd que les électrons. Cette séparation des charges induit un dipôle électrique  $\mathbf{p} = \epsilon_0 \alpha E$  ( $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\alpha$  la polarisabilité de l'atome) qui interagit avec le champ du laser. L'énergie d'interaction résultante, moyennée sur une période d'oscillation du champ électrique, est  $U = - \langle \mathbf{p} \cdot \mathbf{E} \rangle / 2 = - \epsilon_0 \alpha \langle E^2 \rangle / 2$ . Cela signifie que cette énergie d'interaction est grande en valeur absolue là où le champ du laser est le plus intense, c'est-à-dire au voisinage d'un point de focalisation de celui-ci. La polarisabilité  $\alpha$  de l'atome dépend de la différence entre la fréquence  $\omega$  du laser et celle de la transition (ou résonance) atomique  $\omega_0$  choisie pour l'expérience. Dans le cas où

le laser est accordé à une fréquence inférieure à celle de la résonance atomique ( $\omega < \omega_0$ ), le champ électrique varie suffisamment lentement pour que le dipôle induit soit en phase avec lui, et de ce fait  $\alpha > 0$ . Ainsi, un point de focalisation d'un laser constitue un minimum d'énergie pour l'atome et peut être un piège puisque cette énergie augmente (l'intensité diminuant) dès que l'on s'écarte du foyer.

Dans tout ce raisonnement nous avons ignoré l'émission spontanée par l'atome induite par le laser de piégeage. Cette approche est valable dès lors que la fréquence du laser est assez éloignée de celle de la résonance atomique. On montre ainsi que le taux d'émission spontanée varie comme  $1/|\omega - \omega_0|^2$ , alors que la polarisabilité (et donc l'énergie d'interaction atome-laser) varie comme  $1/|\omega - \omega_0|$  : il est par conséquent possible de rendre négligeable l'émission spontanée par un atome, tout en conservant une valeur importante de l'énergie d'interaction entre l'atome et le laser. Dans ce régime, l'action du laser sur l'atome se résume donc à créer un potentiel conservatif (sans dissipation d'énergie).

Une pince optique est un piège optique basé sur le principe décrit ci-dessus, dans la situation particulière où le faisceau laser est focalisé sur une taille de l'ordre de la longueur d'onde  $\lambda$  du laser. Dans ce cas-là, la longueur caractéristique de variation de l'intensité le long de l'axe de propagation (c'est la longueur de Rayleigh pour un faisceau gaussien) est aussi de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, si bien que le volume du piège est de l'ordre de  $\lambda^3$ . Pour un laser opérant autour de  $1 \mu\text{m}$ , cela conduit à un volume de  $1 \mu\text{m}^3$ . Par exemple, un atome de rubidium a une longueur d'onde de résonance autour de  $780 \text{ nm}$ . Si on envoie un laser de longueur d'onde



**Partie centrale du dispositif expérimental de piégeage d'atomes individuels.** La bride métallique supporte des bobines en cuivre permettant de produire le champ magnétique destiné à piéger et refroidir un nuage d'atomes de rubidium, ainsi que le support des lentilles asphériques (pièces métalliques verticales entre les deux bobines). La position du piège se trouve au centre de ce dispositif, entre les deux lentilles asphériques en regard (dont on aperçoit une partie). L'ensemble, dont la photo a été prise au cours du démontage final, sera placé dans l'enceinte à vide, dont on aperçoit une partie à droite de la photo.

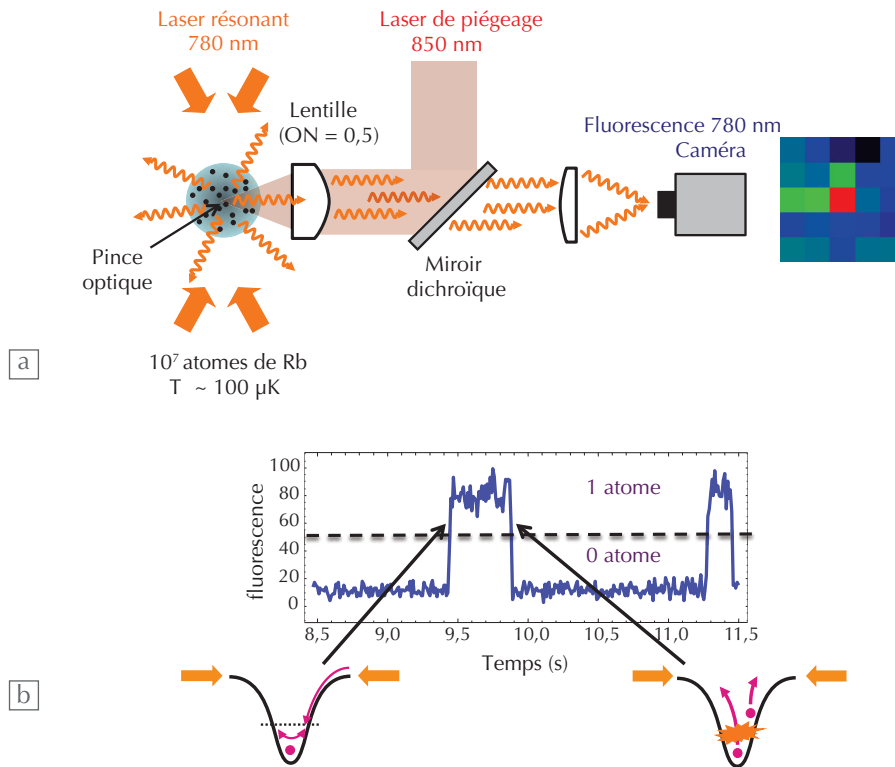
de  $850 \text{ nm}$  et de  $5 \text{ mW}$  de puissance (la puissance typique d'un pointeur laser...), focalisé sur  $1 \mu\text{m}^2$ , la profondeur du potentiel ainsi créé – la pince optique – vaut environ  $1 \text{ millikelvin}$ , comme annoncé plus haut.

## La pince optique en pratique

Focaliser de la lumière sur une tache (un « spot ») de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière n'est pas si facile. En effet, la taille minimale  $w$  du spot est fixée par la limite de diffraction de la lentille utilisée : si celle-ci possède une ouverture numérique  $ON^{(a)}$ ,  $w = 1,22 \lambda / (2 ON)$ . Pour une lentille ouverte à  $ON = 0,5$ ,  $w \approx 1 \mu\text{m}$  pour  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Pour atteindre la limite de diffraction, la lentille ne doit pas présenter d'aberrations. C'est techniquement d'autant plus difficile à obtenir que son ouverture numérique est grande. Bien sûr, on trouve dans le commerce des objectifs de microscope d'excellente qualité avec des ouvertures numériques proches de 1, mais en général au prix

d'une distance de travail petite et, de plus, comportant de nombreuses lentilles accolées que l'on ne peut pas placer facilement sous vide, comme il est souvent nécessaire de le faire pour manipuler des atomes froids. Même si la première réalisation du piégeage d'atomes individuels (voir ci-dessous) a été obtenue avec un objectif à plusieurs lentilles spécialement conçu à cet effet, ce piégeage s'est vraiment développé grâce aux progrès spectaculaires de la technologie des lentilles dites asphériques, c'est-à-dire ayant la bonne forme pour opérer à la limite de diffraction. Ce développement a été motivé par la lecture optique des *compact discs* car plus la taille du faisceau de lecture est petite, plus on peut coder d'information sur le disque. De nos jours, on trouve dans le commerce, pour quelques dizaines d'euros, des lentilles de  $1 \text{ cm}$  de focale (autorisant ainsi une distance de travail plus convenable) et d'ouverture numérique  $0,5$ , exactement ce qu'il nous faut pour produire une pince optique !





### 1. Principe d'une pince optique pour le piégeage d'atomes.

(a) Schéma du montage optique. La pince est produite par un faisceau laser à 850 nm, focalisé par une lentille asphérique d'ouverture numérique 0,5. Un nuage d'atomes de rubidium refroidis par laser, placé au voisinage du foyer de la lentille, sert de réservoir pour charger la pince. La fluorescence émise par les atomes situés dans la région du piège est collectée sur un pixel d'une caméra. La fluorescence apparaît en rouge sur le pixel.

(b) Signal obtenu sur le pixel (en rouge sur la figure a) collectant la lumière provenant de la zone de piégeage en fonction du temps. La brusque augmentation du signal indique l'entrée d'un atome dans la pince (schématisée par le puits de potentiel en bas à gauche), ralenti par les lasers de refroidissement. La brusque disparition correspond à l'entrée d'un deuxième atome dans la pince, suivie d'une collision très rapide catalysée par les lasers à 780 nm, qui expulse les deux atomes et vide donc le piège (schéma en bas à droite).

## Piégeage d'atomes individuels

Nous avons maintenant tous les ingrédients pour comprendre le piégeage d'atomes dans une pince optique et la manière dont nous les observons. Nous réalisons pour cela le montage optique qui porte le nom de « microscopie confocale », très utilisé par exemple en biologie. Il permet de focaliser un faisceau sur une petite tache et de collecter la lumière émise par les atomes situés au foyer. Comme la même lentille est utilisée pour collecter cette lumière, la résolution spatiale est donc égale à la taille de la tache de la pince optique (fig. 1a). Une lentille asphérique est éclairée par un faisceau laser à une longueur d'onde de 850 nm, créant ainsi une pince optique de taille micrométrique. Autour de ce point focal, on produit un nuage d'atomes froids par refroidissement laser. Typiquement, nous collectons dix millions d'atomes de rubidium dans un volume

de  $1 \text{ mm}^3$  autour de la pince optique. Ce refroidissement laser implique la présence de faisceaux laser à une longueur d'onde très proche de celle de la résonance atomique du rubidium ( $\lambda = 780 \text{ nm}$ ). Un des atomes de ce nuage d'atomes froids entre alors à un instant aléatoire dans la pince optique, tout en étant freiné par les faisceaux de refroidissement, et y reste piégé.

Pour observer la présence de l'atome dans la pince, nous collectons avec la même lentille la lumière de fluorescence émise par cet atome soumis en permanence au laser à 780 nm, qui a donc une double fonction : il sert à la fois à ralentir les atomes, mais aussi à éclairer l'atome qui diffuse la lumière. À l'aide d'un miroir dichroïque séparant la lumière à 850 nm de celle de fluorescence à 780 nm, nous envoyons celle-ci sur une caméra en faisant en sorte que toute la lumière provenant de la zone du piège se retrouve sur un pixel de la caméra.

De cette manière on peut « voir » un atome, dans son acception la plus littérale, l'œil de l'observateur étant remplacé par une caméra par simple commodité ! La variation de la quantité de lumière reçue sur le pixel de la caméra en fonction du temps est montrée sur la figure 1b. Nous constatons que partant d'un niveau de lumière très faible correspondant au bruit de fond de l'expérience, le signal augmente soudainement. Nous attribuons ce saut au piégeage d'un atome dans la pince. L'absence de double palier traduit le fait que nous ne piégeons pas deux atomes à la fois. En effet, lorsqu'un deuxième atome entre dans la pince, la lumière à 780 nm catalyse une collision très violente entre les deux atomes, qui les expulse pratiquement instantanément en dehors du piège. Le fait que cette collision soit très rapide provient du volume très faible de la pince optique. Cette source d'atomes individuels est toutefois non déterministe : nous ne pouvons pas

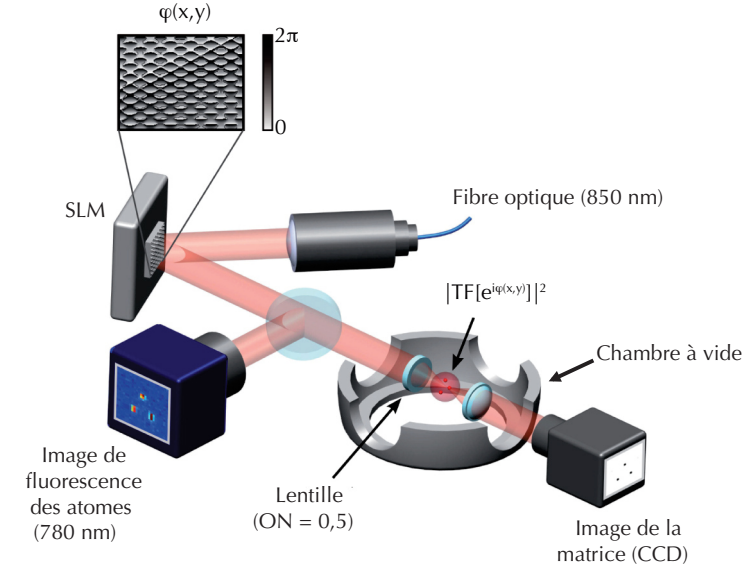
prévoir quand l'atome entre dans la pince. Cependant, dès qu'il est piégé, il signale sa présence par sa fluorescence. Nous pouvons alors placer un seuil sur la quantité de lumière détectée et attribuer un signal haut à la présence d'un atome. Si par la suite nous éteignons tous les faisceaux laser à 780 nm, ne conservant que le faisceau de la pince optique, nous pouvons conserver l'atome pendant près d'une dizaine de secondes avant qu'il ne s'échappe naturellement du piège<sup>(b)</sup> ! C'est amplement suffisant pour réaliser des expériences avec cet atome, car en général celles-ci prennent moins de 100 ms !

La démonstration du piégeage d'atomes uniques par la méthode décrite ci-dessus a été obtenue pour la première fois en 2000 à l'Institut d'Optique par Philippe Grangier et son équipe, au cours de la thèse de doctorat de Nicolas Schlosser, en utilisant un objectif spécialement conçu par les ateliers d'optique de l'Institut [5]. Depuis, en 2007, nous avons démontré, toujours à l'Institut d'Optique, cette méthode en utilisant une simple lentille asphérique commerciale [6]. Une dizaine de groupes de par le monde a maintenant reproduit notre configuration expérimentale.

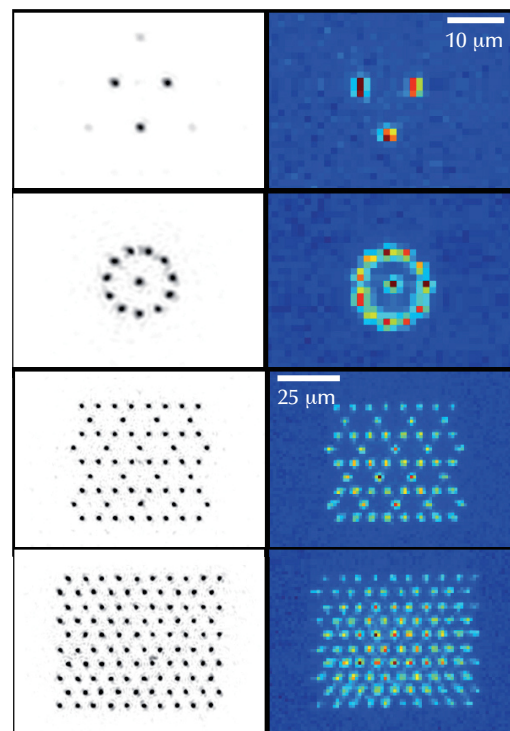
## Fabrication de matrices de pinces : vers des cristaux artificiels d'atomes à deux dimensions

Pour beaucoup d'applications (voir ci-dessous), un seul atome ne suffit pas. Par exemple, de nombreux groupes essaient de contrôler les interactions entre quelques atomes arrangés dans des géométries bien définies. Le montage expérimental décrit plus haut se prête très bien à l'obtention de matrices de pinces optiques de configuration arbitraire.

Pour produire ces matrices, on utilise la diffraction : sur le trajet du faisceau laser de la pince optique on insère un modulateur de phase spatiale. Il s'agit d'un dispositif à base de cristaux liquides dont l'indice optique  $n(x,y)$  peut varier d'un point  $(x,y)$  à un autre du plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière, en fonction d'une tension localement appliquée. Un faisceau lumineux de longueur d'onde  $\lambda$  qui traverse ce dispositif d'épaisseur  $L$  voit sa phase spatiale modulée d'une quantité



a



b

### 2. Production de matrices de pièges optiques.

(a) Dispositif expérimental. Un modulateur de phase spatiale (SLM) imprime une phase  $\varphi(x,y)$  sur le faisceau laser ( $\lambda = 850$  nm) servant au piégeage. Celui-ci est focalisé par une lentille très ouverte. À son foyer, on obtient la figure de diffraction du facteur de phase. En ajustant cette phase, on produit des matrices de pièges de taille micrométrique avec différentes géométries. Chaque piège contient un seul atome dont on détecte la présence par la lumière de fluorescence induite par un laser résonant avec une transition atomique (ici  $\lambda = 780$  nm).

(b) Colonne de gauche : répartitions d'intensité dans le plan focal, mesurées par le capteur CCD situé après la chambre à vide. Colonne de droite : images de fluorescence pour des matrices de pièges contenant au plus un seul atome. Chacune des images est la somme de nombreuses réalisations de la même configuration de piégeage.



$\varphi(x,y) = 2\pi [n(x,y)-1] L / \lambda$ . La théorie de la diffraction enseigne que dans le plan focal de la lentille, la répartition d'intensité est le module carré de la transformée de Fourier du facteur de phase  $e^{i\varphi(x,y)}$ . Ainsi, pour obtenir une répartition d'intensité de géométrie donnée au foyer de la lentille, il suffit de programmer le modulateur de phase pour qu'il génère la modulation de phase  $\varphi(x,y)$  adéquate.

Le problème est en fait un peu plus compliqué qu'il n'y paraît : la théorie de la diffraction indique que ce sont les répartitions de *champ électrique* avant la lentille et dans son plan focal (et non les intensités associées) qui sont transformées de Fourier l'une de l'autre. La donnée de l'intensité du champ dans le plan focal de la lentille ne suffit donc pas : il manque l'information sur la phase pour pouvoir calculer la répartition de champ électrique au niveau du modulateur de phase. D'autre part, la solution d'un tel problème conduit à une répartition de champ avant la lentille modulée à la fois en phase et en amplitude, ce qu'un modulateur de phase pur ne peut évidemment pas réaliser... Le problème a toutefois été résolu dès les années 1970 par le développement d'algorithmes permettant de calculer une phase  $\varphi(x,y)$  qui donne une répartition d'intensité approchée, mais arbitrairement proche de celle souhaitée dans le plan focal de la lentille.

Nous avons donc installé sur notre expérience un tel modulateur de phase pour produire des matrices de pinces optiques [7]. Le schéma optique est représenté sur la figure 2a. La figure 2b montre sur la colonne de gauche quelques exemples de répartition d'intensité obtenus dans le plan focal de la lentille. Lorsque cette matrice de pinces est focalisée dans le nuage d'atomes froids, nous observons sur la lumière de fluorescence que les pièges « clignotent » du fait de l'entrée aléatoire des atomes dans les pinces. Lorsque le nombre de pinces est faible (moins d'une dizaine en pratique), nous attendons que tous les pièges soient remplis pour démarrer une expérience. Si le nombre de pinces dépasse la dizaine, il devient peu probable d'avoir tous les pièges remplis avec un atome et la matrice présente donc des « trous » (en général de l'ordre de 30% du nombre de sites). On connaît toutefois leur position

exacte puisqu'ils apparaissent comme une absence de lumière de fluorescence à la position attendue du piège. Néanmoins, en prenant de nombreuses images successives et en les regroupant, on obtient les images montrées sur la colonne de droite de la figure 2b, sur laquelle tous les pièges ont l'air remplis. Notons que des méthodes ont été récemment suggérées pour augmenter la proportion de pièges remplis à un instant donné.

## Quelques applications des matrices d'atomes

On dispose ainsi par cette méthode de plans d'atomes, arrangés suivant des géométries arbitraires et contrôlables. Les atomes sont séparés les uns des autres de plusieurs micromètres et il est donc relativement aisé de manipuler un atome particulier au sein de la matrice, par exemple à l'aide d'une pince optique supplémentaire que l'on peut focaliser sur un site spécifique de la matrice.

Les arrangements de la figure 2b présentent une certaine similarité avec les matrices cristallines rencontrées en physique du solide. Cette remarque indique que ce système peut servir à simuler des situations de matière condensée. Par exemple, à l'aide de lasers on peut contrôler les interactions entre les atomes. Pour ce faire, notre groupe utilise deux états de l'atome de rubidium, l'un fondamental et l'autre très excité, appelé état de Rydberg<sup>(c)</sup> ; les états de Rydberg correspondent à une orbite très grande de l'électron de valence, dont la taille peut valoir des milliers de fois celle de l'orbite fondamentale. Lorsque deux atomes, distants de quelques micromètres comme dans nos matrices, sont dans leur état fondamental, ils n'interagissent pas<sup>(d)</sup>. Ils interagissent au contraire fortement, même distants de quelques micromètres, lorsqu'ils sont tous les deux excités dans un état de Rydberg : cela provient de la grande séparation entre le noyau et l'électron de valence, qui conduit à un dipôle électrique très élevé.

Or, en physique quantique, on montre qu'un atome qui possède deux états peut être assimilé à un *spin* 1/2 qui possède lui aussi deux états. On peut donc envisager de simuler des systèmes de *spins* en

interaction sur réseau. Nous avons d'ailleurs fait quelques pas dans cette direction avec nos atomes de Rydberg [8]. Ces modèles de *spins* sont couramment utilisés en matière condensée pour modéliser, par exemple, les propriétés magnétiques de certains matériaux. De nombreuses questions restent ouvertes sur ces systèmes, du fait de l'impossibilité de calculer *ab initio* leurs propriétés lorsque le nombre de *spins* dépasse une trentaine dans des géométries de réseau triangulaire, par exemple [9] : c'est précisément ce que nous pouvons effectuer avec nos matrices d'atomes. Plus généralement, ces plans d'atomes permettent de réaliser l'ingénierie quantique de ces systèmes qui pourraient se révéler utiles pour le calcul quantique [10], ou la production d'états quantiques à la sensibilité exacerbée proposée pour la métrologie quantique. Mais tout ceci est une autre histoire... ■

### Remerciements

Je souhaite adresser tous mes remerciements à mes collègues, Yvan Sortais, Thierry Lahaye et Philippe Grangier, ainsi qu'aux étudiants et postdoctorants qui se sont succédés sur ces expériences depuis une dizaine d'années, et dont la liste est malheureusement trop longue pour qu'ils soient cités ici. Ce sont pourtant eux qui font tout le travail expérimental...

(a) L'ouverture numérique d'une lentille de rayon  $R$  et de focale  $f$  est donnée approximativement par  $ON \approx R/f$  pour  $R \ll f$ .

(b) En général, l'atome est perdu à la suite d'une collision sur l'un des atomes du gaz résiduel présent dans la chambre à vide, qui possède, lui, une vitesse très élevée correspondant à une température de 300 K environ.

(c) Voir encadré 2 de l'article de J.-M. Raimond dans ce numéro, p. 42

(d) La portée typique des interactions de van der Waals entre deux atomes dans leur état fondamental est de l'ordre de la taille de l'atome, soit environ 0,1 nm. L'interaction est donc complètement négligeable à 1  $\mu$ m de distance.

## Références

- 1• E. Schrödinger, *British Journal of the Philosophy of Science* **3**, n°10 (1952) 109-123.
- 2• H. Dehmelt, *Rev. Mod. Phys.* **62** (1990) 525.
- 3• M. Leduc et P. Lemonde, *Reflète de la physique* n°21 (2010) 46-51.
- 4• S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips, "Nobel Lectures", *Rev. Mod. Phys.* **70**, n°3 (1998) 685-741.
- 5• N. Schlosser *et al.*, *Nature (London)* **411** (2001) 1024.
- 6• Y.R.P. Sortais *et al.*, *Phys. Rev. A* **75** (2007) 013406.
- 7• F. Nogrette *et al.*, *Phys. Rev. X* **4** (2014) 021034.
- 8• D. Barredo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 113002.
- 9• M. Saffman *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **82** (2010) 2313.
- 10• I.M. Georgescu *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **86** (2014) 153.