

NOV
21-22

Le Creusot

COLLOQUE

**CHALEUR, ÉNERGIE,
THERMODYNAMIQUE -
LE MESSAGE DE CARNOT
AUJOURD'HUI...200 ANS APRÈS**





Programme prévisionnel

9 octobre 2024

Jeudi 21 novembre 2024

Accueil dès 9h00

9h30 Introduction du colloque

10h Conférence inaugurale

La Thermodynamique, d'une simple question d'ingénieurs à la compréhension de l'irréversibilité

(Encyclopédie de l'énergie 2022)

Gilles HENRI, Université Grenoble-Alpes

11h-13h L'œuvre et ses suites (4x30 min)

C1) La cryogénie du LHC, grand collisionneur de hadrons : un héritage de Sadi Carnot au service de la recherche fondamentale

Benjamin BRADU, CERN

C2) Invention et évolution de la notion de rendement thermodynamique - De Carnot à Chambadal, du charbon aux énergies renouvelables.

Luis LE MOYNE, Laboratoire ISAT/DRIVE-uB

C3) Réflexions sur la puissance motrice du Soleil

Daniel SUCHET, École polytechnique, UMR IPVF et Jean-François GUILLEMOLES, CNRS, UMR IPVF

C4) La batterie de Carnot, une technologie prometteuse de stockage de l'électricité

Vincent LEMORT, Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège

13h00-14h15 Pause déjeuner

14h15 Conférence : La thermodynamique et des applications

Une application thermo-industrielle du futur au Creusot « métallurgie des poudres et compaction isostatique à chaud » : le projet EQUIPEX+ CALHIPSO

Frédéric BERNARD, ICB UMR 6303 CNRS-uB

15h15-17h45 Carnot dans les applications thermo-industrielles (5x30 min)

C5) Une pincée de thermodynamique et quelques équations de mécanique des fluides : la recette explosive de l'atomisation des poudres métalliques

Pascal LAMESLE, IRT-M2P Metz

C6) Modélisation de la densification de poudres métalliques ou la thermodynamique des milieux qui se voyaient déjà continus

Jean-Philippe CHATEAU-CORNU, Frédéric BERNARD, ICB UMR 6303 CNRS-uB, et Gilles PERRIN - Framatome

C7) Le cap industriel : tout est une question d'échelle, ou presque

Louis LEMARQUIS, Framatome Saint-Marcel

C8) Le soudage diffusion : tribulations de surfaces qui ne veulent pas disparaître

Pierre-Éric FRAYSSINES, CEA

C9) Propriétés thermodynamiques des plasmas d'arc de soudage. Application à la modélisation CFD d'un arc type TIG

Rodolphe BOLOT, ICB UMR 6303 CNRS-uB, équipe LTM Le Creusot

17h50-18h30 Session de présentation des Posters (8x5 min)

P1) Rendement maximal et optimisation des moteurs thermiques à hydrogène - Zéro émissions et faible consommation

Hugo PANCIN et Luis LE MOYNE, ISAT/DRIVE-uB

P2) Structures dissipatives en optique : solitons et auto-organisation dans les lasers ultrarapides

Philippe GRELU, ICB UMR 6303 CNRS-uB

P3) Convection thermo-capillaire dans un bain métallique liquide aux échelles nanométriques : comment un gradient de température à la surface joue le rôle de force motrice de la convection

Olivier POLITANO et Florence BARAS, ICB UMR 6303 CNRS-uB

P4) Glycine solvation study

Yevgeniy KVIRING, Jean Marc SIMON et José Marcos SALAZAR, ICB UMR 6303 CNRS-uB

P5) Thermalisation et condensation de lumière se propageant dans une fibre optique multimode

Kilian BAUDIN³, Josselin GARNIER³, Lucas ZANAGLIA¹, Theo TORRES², Claire MICHEL¹, Valérie DOYA¹, Bertrand KIBLER², Guy MILLOT² et Antonio PICOZZI²

¹Université Côte d'Azur, CNRS, Institut de Physique de Nice ; ²ICB UMR 6303 CNRS-uB ;

³CMAF, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris

P6) Fonctionnalisation de surface de titane avec un laser nanoseconde en milieu aqueux

Lauryn POSTEC, Iryna TOMASHCHUK, Maria del Carmen MARCO de LUCAS, Jean-Marie JOUVARD, Nataliya ZAITSEVA, Nathan HAGLON et Luc LAVISSE, ICB UMR 6303 CNRS-uB

P7) La thermodynamique calculatoire : un précieux outil pour développer les matériaux du futur

Collectif Département PMDM, ICB UMR 6303 CNRS-uB

P8) Enseigner l'énergie et ses multiples facettes aux étudiants de licence se destinant aux métiers de l'enseignement

Christophe FINOT, UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne

20h00 Soirée dîner

Vendredi 22 novembre 2024

Accueil dès 9h00

9h30 Conférence : Carnot pour demain

Sadi Carnot face à la fin de la civilisation thermo-industrielle. (*Encyclopédie de l'énergie, 2020*)

Joël CHEVRIER, Université Grenoble-Alpes

10h30-13h00 Carnot aujourd'hui pour demain (5x30 min)

C10) Le projet DIADEM : de la thermodynamique à tous les étages

Mario MAGLIONE, ICMCB-CNRS, Université de Bordeaux et Frédéric SCHUSTER, CEA-Programme Transversal Matériaux & Procédés

C11) Sur l'égalité de potentiels chimiques à l'équilibre. Analyse thermodynamique d'images de colloïdes

Jean-Marc SIMON, ICB UMR 6303 CNRS-uB et Isabelle POCHARD, UTINAM UMR 6213 CNRS-UFC Besançon

C12) Exergie et conversion d'énergie : application du second principe de la Thermodynamique

François LANZETTA, Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST

C13) Enseigner et pratiquer la Thermodynamique en Génie des Procédés

Christian JALLUT, LAGEPP - UMR CNRS 5007 – ESCPE Villeurbanne

C14) Présentation de la BD « L'entropie fatale » et table-ronde sur le thème « Comprendre la thermodynamique par l'art ? »

13h00-14h45 Pause déjeuner au Pavillon de l'Industrie et visite de l'exposition temporaire :

« 2023-2024 : Les bicentennaires Carnot, c'est aussi au Creusot. Des savants d'hier pour imaginer demain » préparée par l'Académie François Bourdon

14h45-15h30 Session autour des Posters

15h30-17h30 Conférences de clôture (2x1 h)

Thermodynamique quantique et perspectives quantiques (*Pour la Science, février 2023- CNRS Physique 13 juin 2023*)

Camille LOMBARD-LATUNE, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Thermodynamique, structures dissipatives et phénomènes d'auto-organisation dans les systèmes biologiques

Albert GOLDBETER, Université Libre de Bruxelles

17h30-17h45 Conclusions



Société Chimique de France
Section régionale Bourgogne Franche-Comté



Organisation

Date : jeudi 21-vendredi 22 novembre 2024

Lieu : Académie François Bourdon – Cour du Manège – Château de la Verrerie BP60031 – 71201 Le Creusot Cedex Téléphone : 03 85 80 81 51

Langue du colloque : français principalement et anglais

Publication : le colloque donnera lieu à une publication des actes dans le premier semestre 2025

Comité d'organisation AFB : Gilles Bertrand, Jean-Luc Gisclon, Jean-Marc Pugnet, Claire Le Bras

Comité scientifique ICB : Florence Baras, Gilles Bertrand, Vincent Boudon, Christophe Finot, Tadeusz Sliwa, Didier Stuerga

Partenariats : Région Bourgogne-Franche Comté, Conseil départemental de Saône-et-Loire, Ville du Creusot, Communauté Urbaine Creusot-Montceau, sections Bourgogne-Franche Comté de la Société Française de Physique et de la Société Chimique de France, université de Bourgogne, Fondation Arts et Métiers.

Contact : Gilles Bertrand (gilles.bertrand@u-bourgogne.fr)

Droits d'inscription : 220 euros (pour les étudiants 110 euros). Ce tarif inclut la participation au colloque, les deux déjeuners, le dîner du 21.

Attention, la participation au colloque nécessite au préalable l'inscription et le paiement des droits auprès de l'Académie François Bourdon.

Pour s'inscrire :

Vous trouverez ci-dessous le bulletin d'inscription au colloque. Merci de le compléter et :

- de le renvoyer, accompagné de votre chèque, à l'adresse suivante :
Académie François Bourdon, Cour du Manège-Château de la Verrerie, BP 60031, 71201 Le Creusot Cedex
- ou de le renvoyer par mail à l'adresse suivante, directeur@afboudon.com et de régler l'inscription par virement sur le compte :

"Ass. Acad. François Bourdon" IBAN : FR76 1027 8025 6500 0370 6274 554 – BIC : CMCIFR2A

Date limite d'inscription, 28 octobre 2024



Colloque

« Chaleur, énergie, thermodynamique-Le message de Carnot aujourd’hui... 200 ans après »

BULLETIN D’INSCRIPTION

Date limite d’inscription : 28 octobre 2024

Nom : Prénom :

Organisme :

Fonction :

Adresse :

Téléphone : Courriel :

Merci de nous confirmer votre présence aux repas :

- Déjeuner du 21 novembre, 13h00, à l’Académie François Bourdon
- Dîner du 21 novembre, 20h00, à l’Hôtel Kyriad, Montchanin
- Déjeuner du 22 novembre, 13h00, à l’Académie François Bourdon

Coût de l’inscription : 220 euros (pour les étudiants 110 euros), payable par chèque à l’inscription, à l’ordre de l’Académie François Bourdon ou par virement bancaire sur le compte :

"Ass. Acad. François Bourdon" n°IBAN : FR76 1027 8025 6500 0370 6274 554

Ce tarif inclut la participation au colloque, les 2 déjeuners, le dîner du 21 novembre et les transferts entre le lieu du colloque et l’hôtel Kyriad (jeudi soir et vendredi matin).

Pour l’hébergement, il est conseillé de réserver :

- à l’hôtel Kyriad de Montchanin (56 rue du Pont Jeanne Rose 71210 Montchanin)
- au **B&B HOTEL** Le Creusot Montchanin (68 route du Pont Jeanne Rose 71210 Montchanin)

Pour venir à l’Académie François Bourdon (Cour du Manège – Château de la Verrerie – 71200 Le Creusot) :

- **En voiture** : il est possible de stationner gratuitement sur la place Schneider à deux minutes du Château de la Verrerie
- **Depuis la Gare Le Creusot-Ville** : Le trajet peut se faire à pied, compter 15 minutes.
- **Depuis la Gare TGV Le Creusot – Montceau – Montchanin** : Une navette en bus permet de rejoindre le centre-ville du Creusot. Les horaires sont disponibles ici : <https://www.monrezo.org/line/tgv/>. Prix du billet : 1€20. Descendre à l’arrêt Schneider, à deux minutes de l’Académie François Bourdon.

Pour tout renseignement complémentaire, n’hésitez pas à nous contacter : directeur@afbouardon.com

Résumés des communications

1) Conférences

Gilles HENRI, Université Grenoble-Alpes

La thermodynamique, d'une simple question d'ingénieurs à la compréhension de l'irréversibilité.
(Encyclopédie de l'énergie 2022)

La thermodynamique est une des sciences majeures de la physique : élaborée au XIX^e siècle, elle a dépassé très largement le cadre initial qui l'a motivée, celui de comprendre le fonctionnement des machines thermiques, qui fonctionnaient empiriquement sans que l'on en comprenne vraiment le principe. Nous retracerons le parcours de cette aventure scientifique extraordinaire, qui est partie de considérations matérielles très concrètes et de travaux empiriques d'ingénieurs dans un contexte de recherche d'efficacité et d'économies qui n'est pas sans rappeler les problématiques actuelles. Elle a commencé à progresser réellement grâce aux intuitions géniales de Sadi Carnot, qui a saisi l'importance fondamentale de considérer les processus réversibles comme cas limites idéaux de transformations réelles, puis s'est poursuivie avec de brillants successeurs comme Clapeyron, Meyer, Clausius, qui ont fait émerger les concepts fondamentaux d'énergie et d'entropie, puis la réalisation avec Maxwell et Boltzmann que cette théorie était en réalité une théorie très générale de statistique d'un très grand nombre de particules, faisant le lien avec les théories microscopiques de la matière. Sous la forme de la physique statistique, elle est devenue maintenant une théorie universelle de la physique, s'appliquant à tous les systèmes connus, et elle se retrouve au cœur de questionnements fondamentaux sur la nature du temps et la notion d'irréversibilité, y compris pour des systèmes aussi exotiques que les trous noirs.

Frédéric BERNARD, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Une application thermo-industrielle du futur au Creusot « Métallurgie des poudres et compaction isostatique à chaud » : le projet EQUIPEX+ CALHIPSO

Grâce aux avancées technologiques autour des procédés de la métallurgie des poudres, il va être possible d'explorer et de développer de nouvelles applications, notamment via l'émergence de matériaux et de composants innovants. Le programme Equipex+ CALHIPSO (ANR21-ESRE-0039), motivé par de nouveaux enjeux environnementaux, stratégiques et techniques, ambitionne de s'inscrire dans cette dynamique et, ce, en vue de garantir l'avenir de la filière métallurgique. Ainsi, nous cherchons à mettre en œuvre des technologies (i) **de fabrication de composants aux plus proches des dimensions finales ou NNS (Near-Net-Shape)** et (ii) **d'assemblages de composants complexes** par diffusion, via la technologie de compression isostatique à chaud (CIC) en proposant une approche globale d'expérimentation, de modélisation et de simulation (multi-échelles et multi-physiques) pour définir des solutions taillées à la mesure des besoins de la recherche et de l'industrie.

Joël CHEVRIER, Université Grenoble-Alpes

Sadi Carnot face à la fin de la civilisation thermo-industrielle (Encyclopédie de l'énergie, 2020*)

(*) <https://www.encyclopedie-energie.org/sadi-carnot-face-a-la-fin-de-la-civilisation-thermo-industrielle/>

Écrit dans l'introduction du livre de Sadi Carnot : « *Elles (les machines à feu) paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé.* » Écrire cela en 1824 était visionnaire. Stupéfiant. Certes, dans son monde quasi-infini d'un milliard d'individus, le constat était évident : le

passage de la puissance animale et humaine, 100-1000W, à celle des machines immédiatement bien au-delà et produites industriellement ! Il annonçait un changement du monde, et il a eu lieu : la civilisation thermo-industrielle a envahi la planète et changé le monde.

Quelles visions ensuite ? Ici une tentative en 3 étapes :

- On peut se demander si ce n'est pas d'abord le rapport Meadows au MIT, *The Limits to Growth*. En 1972, 150 ans plus tard, pour simuler l'évolution du monde, les auteurs identifient 5 paramètres essentiels et les lois de conservation afférentes. Dans un monde maintenant fini, avec 4 milliards de personnes, et des machines qui ont produit « la révolution de Carnot », au prix du réchauffement climatique, cette approche scientifique fait émerger brutalement la question de la soutenabilité. Ce rapport se vendra à 30 millions d'exemplaires en 30 langues.
- En 2024, deux cents ans après Carnot, les conséquences pour la vie sur la planète de la civilisation thermo-industrielle mondialisée sont toujours plus aiguës. Quelle vision globale, au niveau de celle de Carnot, à la suite du rapport Meadows ? Probablement celle issue de la mise en place des limites planétaires telle que présentées par le chercheur Johan Rockström.
- Et on trouve chez Sadi Carnot, en fin d'introduction de son livre : « *C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie.* » Pensée toujours aussi claire : la grande machine énergétique sur la Terre est bien celle qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, en mouvements et en vie. Et ce de très loin. Pour la seule vie, la contribution est dans une mesure toujours très largement au-delà des 150 000 TWh mis en jeu par l'activité humaine chaque année.

Camille LOMBARD-LATUNE, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Thermodynamique quantique et perspectives quantiques (*Pour la Science, février 2023- CNRS Physique 13 juin 2023*)

L'objectif de cette présentation est d'introduire les principales questions et motivations d'un domaine de recherche en plein essor qui se propose d'appliquer et d'étendre la Thermodynamique aux systèmes quantiques.

Nous commencerons tout d'abord par nous pencher sur les moteurs thermiques quantiques et réfrigérateurs quantiques. Nous mentionnerons le rôle que certaines propriétés quantiques peuvent avoir sur les performances de ces dispositifs, mais nous verrons aussi que leur mise en pratique reste assez complexe. Cependant, et indépendamment de possible avantages quantiques, nous citerons des applications prometteuses pour les réfrigérateurs quantiques.

Ensuite, nous plongerons dans le monde de l'information quantique vue par le spectre de la thermodynamique quantique. Nous parlerons de certaines avancées théoriques importantes liées au bruit quantique et aux fluctuations quantiques (les fameuses égalités de Jarsynski, ainsi que les relations d'incertitudes thermodynamiques et cinétiques), avec des implications pour le contrôle des fluctuations quantiques.

Finalement, nous finirons en mentionnant d'importantes perspectives pour l'informatique quantique, et plus généralement pour les technologies quantiques.

Albert GOLDBETER, Université Libre de Bruxelles

Thermodynamique, structures dissipatives et phénomènes d'auto-organisation dans les systèmes biologiques

Dans son livre « *Vie, Matière et Observation* »¹, Léon Brillouin pose d'emblée la question : « Comment peut-on comprendre la vie alors que le monde entier est régi par une loi telle que le second principe de thermodynamique, ou principe de Carnot, qui aboutit à la mort et à la destruction totale ? » Cette

question est au cœur des travaux de thermodynamique de nonéquilibre²⁻⁴ qui ont valu à Ilya Prigogine le Prix Nobel de Chimie en 1977. Prigogine a montré qu'au-delà d'une instabilité correspondant à une bifurcation, les systèmes chimiques ouverts sont capables de s'autoorganiser dans le temps et/ou dans l'espace sous forme de structures dissipatives. Celles-ci trouvent de multiples illustrations en physique et en chimie, et plus encore dans les sciences du vivant. Le but de l'exposé sera de montrer comment le fonctionnement des systèmes vivants repose en partie sur leur capacité à s'autoorganiser dans le temps, comme le montre l'abondance des rythmes biologiques^{5,6}, et dans l'espace, comme l'attestent les phénomènes de propagation d'ondes et d'autres types d'organisation spatiale au niveau supra-cellulaire. Les systèmes ouverts loin de l'équilibre ont également la capacité de basculer entre différents états stationnaires simultanément stables ; cette multi-stabilité sous-tend, par exemple, la différenciation cellulaire. Les systèmes vivants représentent le domaine par excellence des structures dissipatives⁷ en raison de leur non-linéarité qui trouve sa source principale dans les processus de régulation apparus au cours de l'évolution biologique.

1. Brillouin, L. *Vie, Matière et Observation*, Albin Michel, Paris, 1959.
2. Prigogine, I., *Introduction à la Thermodynamique des Processus Irréversibles*, Dunod, Paris, 1968.
3. Glansdorff, P., Prigogine, I., *Structure, Stabilité et Fluctuation*, Masson, Paris, 1970.
4. Nicolis, G., Prigogine, I., *Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, Wiley, New York, 1977.
5. Goldbeter, A., *Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms: The molecular bases of periodic and chaotic behaviour*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
6. Goldbeter, A., *Au cœur des rythmes du vivant. La vie oscillatoire*, Odile Jacob, Paris, 2018.
7. Goldbeter A., 2018., *Dissipative structures in biological systems: Bistability, oscillations, spatial patterns, and waves*. Phil. Tran. R. Soc. A 376 : 20170376.

2) Communications

C1) Benjamin BRADU, CERN

La cryogénie du LHC, grand collisionneur de hadrons : un héritage de Sadi Carnot au service de la recherche fondamentale

Le LHC (Large Hadron Collider) est le plus grand accélérateur de particules au monde et une des machines les plus sophistiquées jamais construites par l'homme. Il est situé au CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse et a été conçu pour répondre à certaines des questions les plus fondamentales de la physique des particules. Une des particularités du LHC est que, pour fonctionner, il doit être maintenu à une température proche du zéro absolu. C'est donc 36 000 tonnes de métal sur 27 km de circonférence qui doivent être refroidis à 1,9 K, exploitant les principes de la thermodynamique élaborés par Sadi Carnot il y a près de deux siècles pour repousser les limites de notre compréhension de l'univers.

C2) Luis LE MOYNE, ISAT/DRIVE-uB

Invention et évolution de la notion de rendement thermodynamique - De Carnot à Chambadal, du charbon aux énergies renouvelables

En revisitant les principes de Carnot, nous examinerons également les développements contemporains dans l'optimisation des rendements énergétiques, tant dans les systèmes traditionnels que dans les technologies émergentes et jusqu'à l'appréhension du fonctionnement des organismes vivants. Il sera mis en évidence comment dans le contexte de son époque l'œuvre de Carnot a permis le développement des concepts et approches dont les technologies nouvelles sont directement issues. Un focus particulier sera fait sur les moteurs des véhicules.

C3) Daniel SUCHET, École polytechnique, UMR IPVF et Jean-François GUILLEMOLES, CNRS, UMR IPVF

Réflexions sur la puissance motrice du Soleil

Source de chaleur par excellence, le Soleil rayonne vers la Terre une puissance dix mille fois supérieure aux besoins d'énergie de l'humanité. Tirer parti de cette manne énergétique nécessite cependant de parvenir à capter et à convertir la lumière. Cette conversion peut aujourd'hui être réalisée par plusieurs familles de technologies, à différents degrés de maturité : solaire photovoltaïque, thermique, à concentration... Si leurs applications sont différentes, toutes ces technologies doivent répondre à des contraintes fondamentales communes, et on peut, comme Carnot, « envisager dans toute sa généralité le principe de la production du mouvement par la chaleur » du Soleil. Mais contrairement aux « machines à feu », le couplage avec la source chaude est ici radiatif, ce qui ajoute des contraintes particulières dont il faut tenir compte. Dans cet exposé consacré aux machines radiatives, on retrouvera donc des termes familiers, mais aussi des expressions particulières qui donneront les clés de compréhension des technologies solaires.

C4) Vincent LEMORT, Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège

La batterie de Carnot, une technologie prometteuse de stockage de l'électricité

La première partie de la communication présentera un état de l'art technique sur les batteries de Carnot, un dispositif qui permet de stocker de l'électricité et qui constitue une alternative aux batteries électrochimiques et au stockage par pompage/turbinage.

Ce système associe une pompe à chaleur, un ou plusieurs stockages thermiques et un moteur thermodynamique. Lorsque l'électricité doit être stockée, elle est utilisée pour entraîner une pompe à chaleur. Les énergies frigorifiques et/ou calorifiques générées sont stockées. En mode décharge, les énergies thermiques stockées sont reconverties en électricité au moyen du moteur thermodynamique. Nous aborderons les différentes technologies de pompes à chaleur, de stockages thermiques et de moteurs thermodynamiques, en lien notamment avec les niveaux de températures visés. Les critères de performance (rendement énergétique, rendement exergétique, densité de stockage et performance économique) seront discutés.

La seconde partie de la communication décrira les activités de recherche en cours au Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. Depuis 2016, le Laboratoire étudie « l'inversabilité » d'une pompe à chaleur en machine à cycle de Rankine, ce qui permet de combiner les deux machines thermodynamiques en une seule machine et ainsi de réduire la taille et le coût de la batterie de Carnot. Les résultats expérimentaux obtenus sur deux prototypes de batterie de Carnot inversibles seront présentés. Une piste de recherche concerne l'intégration des batteries de Carnot dans des procédés industriels présentant une production locale d'électricité et des rejets de chaleur fatale. Ces derniers peuvent en effet être valorisés pour augmenter le coefficient de performance de la pompe à chaleur et donc le rendement charge/décharge de la batterie de Carnot. Enfin, une dernière piste traite du stockage massif de l'énergie au moyen de batterie de Carnot couplées à des anciennes galeries de mines noyées et utilisées comme réservoirs thermiques.

Nous concluons la communication en abordant les perspectives de travaux futurs en lien avec l'évolution du paysage énergétique européen.

C5) Pascal LAMESLE, IRT-M2P Metz

Une pincée de thermodynamique et quelques équations de mécanique des fluides : la recette explosive de l'atomisation des poudres métalliques

L'atomisation au gaz sous pression est la principale technique de production de poudres métalliques fournissant des particules fines et sphériques utilisées en fabrication additive, en projection thermique ou en métallurgie des poudres. Le mécanisme de base consiste à fragmenter un flux de métal liquide

par l'impact d'un jet de gaz à grande vitesse. La demande toujours croissante de poudres aux propriétés améliorées avec de nouvelles compositions chimiques ainsi que la prise en compte d'exigences de plus en plus fortes liées à la réduction de consommation d'énergie et de gaz, imposent d'optimiser davantage les performances de ces procédés. Ces améliorations passent par une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements de gaz, des interactions entre le gaz et le flux de métal liquide et de la dynamique de fragmentation du métal liquide liés aux paramètres thermodynamiques (énergie de surface, changement de phase, transfert de chaleur...) et cinétiques (vitesses de circulation, de refroidissement...). En raison des phénomènes multiphasiques complexes impliqués, seule la modélisation et la simulation numérique détaillées du procédé permettent d'apporter ces éléments de compréhension pour une meilleure maîtrise du procédé afin d'optimiser le rendement et la qualité des poudres produites.

C6) Jean-Philippe CHATEAU-CORNU, Frédéric BERNARD, ICB UMR 6303 CNRS-uB, et Gilles PERRIN, Framatome
Modélisation de la densification de poudres métalliques ou la thermodynamique des milieux qui se voyaient déjà continus

À l'instar des spores de lycopode prompts à s'enflammer de façon détonante, les matériaux pulvérulents sont instables en raison de leur surface spécifique élevée. Cette propriété peut être utilisée pour produire des matériaux massifs à partir de poudres, celles-ci tendant naturellement à diminuer leur énergie de surface. Cependant, le processus étant pour le moins très lent, il convient pour des applications industrielles de les aider en les chauffant et en les comprimant via les procédés dits de frittage sous charge (SPS ou HIP). Afin de prédire la forme finale et l'état de contrainte des pièces, il est nécessaire de développer des modèles de déformation des poudres. Bien qu'appliquées à des milieux divisés, les lois de comportement utilisées reposent sur le second principe appliqué à la mécanique des milieux continus homogènes, que ce soit pour modéliser un réarrangement particulaire (critères de « plasticité » d'un milieu granulaire) ou la fermeture de cavités (lois d'écoulement viscoplastique d'un milieu poreux).

C7) Louis LEMARQUIS, Framatome Saint-Marcel

Le cap industriel : tout est une question d'échelle, ou presque

Depuis plus de 15 ans, Framatome travaille au développement pour l'industrie nucléaire du procédé de Compaction Isostatique à Chaud, dit CIC. Ce procédé combine une montée en pression et une montée en température afin de densifier thermomécaniquement la poudre métallique sans fusion. Il présente plusieurs intérêts tant technique/matériaux qu'industriel. L'appréhension d'une nouvelle technologie commence toujours par une phase d'études R&D à des niveaux réduits, mais le passage à une échelle supérieure, ou upscaling, est semé d'un certain nombre d'embûches : répétabilité à l'échelle industrielle des propriétés obtenues à l'échelle R&D, robustesse des chaînes d'approvisionnement, requis de traçabilité... et en particulier si cette technologie qui repose sur la déformation mécanique et la diffusion à hautes températures permet de produire des pièces de grandes dimensions. Framatome est à présent dans cette dynamique pour la CIC par le biais de différents projets, dont le consortium CalHIPso.

C8) Pierre-Eric FRAYSSINES, CEA

Le soudage diffusion : tribulations de surfaces qui ne veulent pas disparaître

Le soudage diffusion est un procédé d'assemblage à l'état solide qui repose sur la diffusion des atomes au travers d'une interface pour former un joint. Ce procédé est utilisé pour réaliser des assemblages multi-matériaux complexes qui présentent d'excellentes propriétés mécaniques. À très haute température, la diffusion est rapide et le mécanisme de grossissement de grain permet le franchissement d'interface permettant idéalement d'obtenir un joint indiscernable du matériau de

base. Ainsi le soudage diffusion permet l'assemblage de matériau sans discontinuité abrupte de microstructure et avec des déformations minimales. La thermodynamique joue un rôle très important dans la maîtrise du procédé car d'une part les enceintes de CIC font intervenir de l'Argon à haute pression et haute température et que d'autre part la microstructure des métaux évolue tout au long du procédé d'assemblage.

C9) Rodolphe BOLOT, ICB UMR 6303 CNRS-uB, équipe LTM Le Creusot

Propriétés thermodynamiques des plasmas d'arc de soudage. Application à la modélisation CFD d'un arc type TIG

La modélisation CFD (Computational Fluid Dynamics) des arcs de soudage nécessite la connaissance des propriétés thermodynamiques et coefficients de transport des gaz/mélanges concernés. Une méthode de minimisation de l'énergie libre de Gibbs permet de déterminer la composition du plasma en question. La théorie cinétique des gaz permet d'en estimer les coefficients de transport (dont viscosité ou conductibilité électrique). La connaissance de ces données permet ensuite d'effectuer des calculs CFD d'arcs de soudage (sous un logiciel tel que ANSYS/FLUENT).

C10) Mario MAGLIONE, ICMCB-CNRS, Université de Bordeaux et Frédéric SCHUSTER, CEA - Programme Transversal Matériaux & Procédés

Le projet DIADEM* : de la thermodynamique à tous les étages

(*) <https://www.pepr-diadem.fr/>

Sélectionné par un jury international en 2021, le Programme d'Équipement Prioritaire et de Recherche DIADEM a pour ambition d'accélérer la découverte et le déploiement de nouveaux matériaux. Les plateformes mises en place sur tout le territoire national depuis 2022 ont pour objectif la synthèse et la caractérisation accélérée des matériaux autour d'une infrastructure numérique centrée sur le partage des données, la modélisation et l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA).

Comme toujours, la synthèse, la mise en forme et la modélisation de matériaux avancés requiert une connaissance et un contrôle des paramètres thermodynamiques des procédés. Parmi les 34 projets déjà en cours, trois exemples seront plus particulièrement décrits :

- La métallurgie, en particulier celles des Alliages à Haute Entropie (HEA) qui nécessite la mise en œuvre de modélisations thermodynamiques pour orienter les expérimentateurs au sein de diagrammes de phases de très haute complexité. Les enjeux applicatifs concernent la résistance à la corrosion, la catalyse, la fabrication additive.
- Le dépôt de couches minces fonctionnelles avec un contrôle *in situ* des paramètres thermodynamiques permettant un ajustement dynamique des paramètres des procédés. L'exemple de la Déposition Chimique en Phase Vapeur (CVD) sera explicité avec un enjeu fort sur la protection des surfaces.
- La micro-fluidique pour laquelle la faible taille des réacteurs implique une interaction forte entre les paramètres thermodynamiques Pression et Température et le flux des réactifs. Le criblage à haut débit de matériaux inorganiques et organiques tout en réduisant les quantités de réactifs et le nombre d'essais est au cœur de cette démarche.

Un dernier point sera également abordé concernant la formation initiale et continue, condition absolument nécessaire à faire de l'IA un nouvel outil utilisé de manière raisonnée par les chercheurs et ingénieurs en matériaux.

Ce programme bénéficie du financement de l'ANR-22-PEXD-0001 dans le cadre du projet France2030.

C11) Jean-Marc SIMON, ICB UMR 6303 CNRS-uB et Isabelle POCHARD, UTINAM UMR 6213 CNRS-UFC Besançon

Sur l'égalité de potentiels chimiques à l'équilibre. Analyse thermodynamique d'images de colloïdes

L'égalité du potentiel chimique à l'équilibre est une notion clé qui est très largement utilisée en chimie en particulier pour prédire l'évolution de systèmes hors d'équilibre vers l'état d'équilibre. Cette notion sera ici illustrée par une expérience simple. Des colloïdes (amidine latex) en suspension dans de l'eau à différentes concentrations sont mis en contact avec une lamelle de verre où ils se déposent et sont adsorbés. À partir d'image de population de ces colloïdes sur le verre, nous remontons à l'évolution de leur potentiel chimique. Cette évolution est la même que dans la suspension ce qui permet d'illustrer simplement cette notion d'égalité du potentiel chimique entre les particules en suspension et celles présentes dans la phase adsorbée. L'analyse des cinétiques d'adsorption permet également de montrer que les systèmes approchent l'état d'équilibre en suivant des chemins thermodynamiques différents en fonction de l'état initial du système : loin d'équilibre ou proche.

C12) François LANZETTA, Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST

Exergie et conversion d'énergie : application du second principe de la Thermodynamique

La valorisation des rejets thermiques issus des procédés industriels comme dans le bâtiment et le transport nécessite l'emploi de machines thermiques dont on cherche à augmenter l'efficacité. Cette article traite ainsi de la maximisation de la conversion d'énergie vue sous l'angle de l'exergie par l'application du second principe de la thermodynamique. L'objectif est, à travers certains critères de performance énergétique, d'optimiser le fonctionnement d'un convertisseur thermomécanique (moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur) en minimisant les pertes thermiques et fluidiques et maximisant ainsi ses performances. Le second principe de la thermodynamique est ainsi utilisé de manière très concrète dans le but final pour nos sociétés de réduire les gaz à effet de serre et les consommations d'énergie primaire.

C13) Christian JALLUT, LAGEPP - UMR CNRS 5007 – ESCPE Villeurbanne

Enseigner et pratiquer la Thermodynamique en Génie des Procédés

Dans l'Introduction de son ouvrage¹ Gianni Astarita écrit : « Thermodynamics, like any other branch of engineering science, is really made up of three parts : fundamental laws, constitutive equations, and engineering applications ». À partir de ce constat, nous organisons l'enseignement de la Thermodynamique macroscopique en distinguant la Thermodynamique des systèmes, la Thermodynamique de la matière et l'Ingénierie thermodynamique.

La Thermodynamique des systèmes : il s'agit essentiellement de l'apprentissage des principes de conservation appliqués aux grandeurs extensives pertinentes en Thermodynamique, à savoir la matière, l'énergie et l'entropie. L'entropie est présentée comme variable conjuguée de la température et on peut à partir de quelques exemples simples montrer son caractère non conservatif. L'analyse du moteur thermique en régime stationnaire de Carnot devient une application. Les bilans d'énergie et d'entropie sont restreints aux situations fréquemment rencontrées dans les industries de procédés. Les bilans d'énergie et d'entropie conduisent aussi à l'expression de conditions générales d'équilibre basées sur les énergie et enthalpie libres.

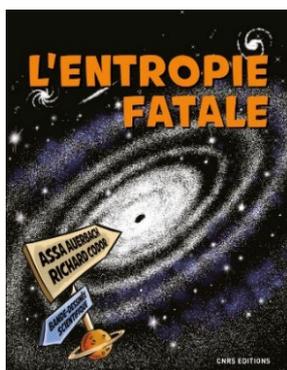
La Thermodynamique de la matière : pour résoudre ou simuler numériquement les modèles de procédés basés sur les principes de base, il faut connaître les propriétés de la matière qui apparaissent dans ces modèles : l'enthalpie, l'énergie interne, le potentiel chimique... La détermination expérimentale de ces propriétés et leur modélisation conduisent à l'élaboration des équations constitutives nécessaires à la mise en œuvre de la Thermodynamique des systèmes. On présente les modèles principalement utilisés pour les phases fluides.

L'Ingénierie thermodynamique : on applique simultanément les principes de conservation, les conditions d'équilibre et les modèles de calcul des propriétés thermodynamiques de la matière pour

modéliser les procédés. Cette combinaison est rendue possible par le principe de l'équilibre local. L'avènement des outils informatiques et des logiciels de simulation de procédés a permis d'utiliser plus systématiquement les modèles analytiques de calcul de propriétés et d'adresser des situations complexes. Une initiation à ce type de logiciel est proposée dans le cadre de l'enseignement de la Thermodynamique.

1. G. Astarita (1989), *Thermodynamics. An advanced textbook for chemical engineers*, Plenum Press, New-York

C14) **Présentation de la BD « L'entropie fatale »**, écrite par Assa Auerbach et Richard Codor, traduite de l'anglais par Bertrand Delamotte (Sorbonne Université-LPTMC), CNRS Editions, 2019



Il n'y a pas de crise de l'énergie, il y a une crise de l'entropie. Max, héros d'une expérience de pensée du physicien Maxwell, est capable de violer la deuxième loi de la thermodynamique. Ce super-pouvoir lui vaut d'être appelé à la rescousse pour sauver la Terre du désastre environnemental qui la guette. Avant toute chose, Max doit apprendre, auprès des meilleurs physiciens, ce que sont l'énergie, la chaleur, l'entropie. Il y a du suspense, des super-méchants, et une catastrophe imminente. De l'humour et de la science.

3) Posters

P1) Hugo PANCIN, Luis LE MOYNE, ISAT/DRIVE-uB

Rendement maximal et optimisation des moteurs thermiques à hydrogène - Zéro émissions et faible consommation

L'hydrogène comme vecteur énergétique pour une mobilité durable nécessite dans l'application aux machines thermiques une optimisation et une évolution par rapport aux concepts classiques et architectures usuelles. Nos travaux montrent que couplée à l'injection d'eau la combustion de l'hydrogène permet des niveaux d'émission très faibles et des rendements thermodynamiques compétitifs.

P2) Philippe GRELU, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Structures dissipatives en optique : solitons et auto-organisation dans les lasers ultrarapides

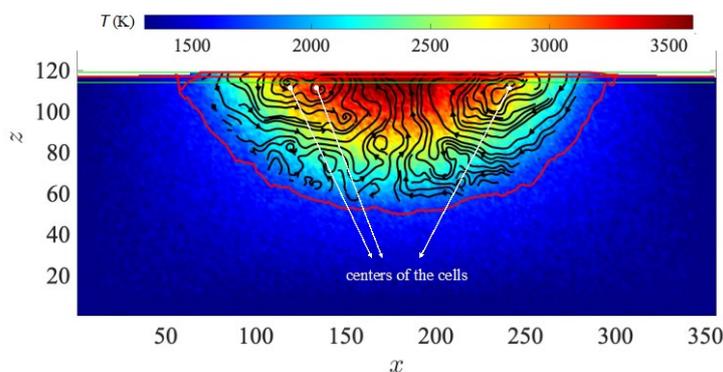
Le laser est une source de lumière cohérente, qualifiée généralement de directionnelle, intense, monochromatique (ou du moins chromatique). On ne compte plus ses applications scientifiques, technologiques, industrielles, médicales et militaires. Du point de vue de la physique fondamentale, le laser est un système non-linéaire, ouvert et dissipatif. Associé à un ensemble de paramètres clés accessibles, ceci permet au laser de fonctionner sur de nombreux régimes différents, dont les régimes dits impulsions, recherchés pour les applications profitant d'une énergie concentrée à la fois dans l'espace et dans le temps. En particulier, les régimes d'impulsions optiques ultracourtes présentent une structuration temporelle du champ à l'échelle picoseconde ou femtoseconde, qui résulte d'une auto-organisation. Afin de mieux comprendre l'émergence de ces impulsions ultracourtes en cavité laser, le concept de soliton optique dissipatif a été élaboré et appliqué avec succès au cours des vingt dernières années. On retrouve ainsi des points communs remarquables avec les avancées conceptuelles de Turing et de Prigogine concernant l'auto-organisation dans les systèmes ouverts, où un flux d'énergie

et la dissipation permettent, en présence de non-linéarités, la formation de patterns stables, perdurant tant que demeure la source d'énergie. Les notions d'attracteurs et de bifurcations sont centraux dans cette description, qui par ailleurs associe en correspondance plusieurs catégories de solitons dissipatifs, stationnaires, pulsants ou chaotiques, ainsi que leurs superstructures, telles que des molécules de solitons optiques.

P3) Olivier POLITANO et Florence BARAS, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Convection thermo-capillaire dans un bain métallique liquide aux échelles nanométriques : comment un gradient de température à la surface joue le rôle de force motrice de la convection

Nous avons étudié la convection thermo capillaire dans un système nanométrique de nickel en utilisant des simulations de dynamique moléculaire. En irradiant la surface du système par un flux de chaleur, imitant une source laser focalisée, le nickel fond localement. De plus, la surface de la zone de nickel fondu est soumise à un gradient de température important qui modifie la tension de surface le long de l'interface. En effet, la tension de surface entre le métal liquide et le gaz environnant diminue quand la température augmente. Il en résulte un gradient de tension de surface le long de la surface libre opposé au gradient de température. Le métal liquide se met à s'écouler dans la direction où la tension de surface est élevée. Deux cellules de convection contre-rotatives se développent comme celles qui sont observées dans le soudage et d'autres procédés de traitement des matériaux.



P4) Yevgeniy KVIRING, Jean Marc SIMON et José Marcos SALAZAR, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Glycine solvation study

In this work, we studied a two-component system consisting of liquid water and glycine at different concentrations and temperatures, starting from the room temperature down to so-called "No-man's land". Studying glycine's solvation, especially in its zwitterionic form, provides insights into the behavior of more complex amino acids and peptides in supercooled water.

Understanding solvation is crucial since the interaction of solute molecules with a solvent significantly influences the properties and behaviors of the solute. This is particularly relevant in aqueous solutions, where water molecules form complex hydration shells around solute molecules.

To study this process the combination of molecular dynamics simulations with Kirkwood and Buff theory of solvation was used. This allowed us to make the link between structure and thermodynamics in studied systems.

P5) Kilian BAUDIN³, Josselin GARNIER³, Lucas ZANAGLIA¹, Theo TORRES², Claire MICHEL¹, Valérie DOYA¹, Bertrand KIBLER², Guy MILLOT² et Antonio PICOZZI²

¹Université Côte d'Azur, CNRS, Institut de Physique de Nice ; ²ICB UMR 6303 CNRS-uB ;

³CMAP, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris

Thermalisation et condensation de lumière se propageant dans une fibre optique multimode

En considérant la propagation de lumière dans une fibre optique multimode, nous montrons expérimentalement que le champ optique relaxe au cours de sa propagation vers la distribution

d'équilibre thermodynamique de Rayleigh-Jeans. Plus précisément, le système exhibe une transition de phase vers l'état condensé, lequel se manifeste par une population macroscopique du mode fondamental de la fibre optique, en accord avec la théorie. Les propriétés thermodynamiques de la condensation d'ondes classiques sont discutées, ainsi que les différences avec la condensation de Bose-Einstein quantique.

P6) Lauryn POSTEC, Iryna TOMASHCHUK, Maria del Carmen MARCO de LUCAS, Jean-Marie JOUVARD, Nataliya ZAITSEVA, Nathan HAGLON et Luc LAVISSE, ICB UMR 6303 CNRS-uB

Fonctionnalisation de surface de titane avec un laser nanoseconde en milieu aqueux

La fonctionnalisation de la surface des métaux à l'aide d'un laser permet de produire les couches d'insertion des éléments légers présentant les caractéristiques morphologiques divers et trouvant des vastes applications. Ces traitements sont typiquement réalisés à l'air ambiant ou dans les mélanges gazeux O_2-N_2 . La présente étude explore les effets du traitement de la surface du titane avec laser nanoseconde Nd:YAG ($\lambda = 532$ nm) dans le milieu aqueux. L'oxydation du TiO jusqu'à TiO_2 dans l'eau est très favorable thermodynamiquement par rapport au système titane-air, puisque l'oxygène se trouve déjà à l'état lié. Le système H-O-Ti modélisé sous Thermo-Calc démontre les mêmes phases Ti_xO_y que le système binaire Ti-O. Mais, contrairement au système titane-air, les sous-oxides TiO et Ti_2O_3 sont considérés comme thermodynamiquement instables dans l'eau. Dans un premier temps, des lignes individuelles réalisées sur titane par laser à l'air et dans l'eau ont été étudiées. Il a été trouvé que les lignes obtenues dans le milieu aqueux présentent un taux d'insertion d'oxygène plus important que les lignes obtenues à l'air, ce qui est dû aux facteurs thermodynamiques ainsi qu'à la dissociation de la molécule H_2O sous effet du plasma généré par titane. Cependant, les surfaces obtenues dans l'eau par les scans linéaires successifs ne contiennent que les sous-oxydes Ti_2O_3 et TiO, contrairement au traitement dans l'air produisant une couche externe du TiO_2 . Ceci peut être attribué à la perte des particules du TiO_2 dans la phase aqueuse et au refroidissement brutal de la zone traitée accentuant les facteurs cinétiques de la formation d'oxydes.

P7) Collectif Département PMDM, ICB UMR 6303 CNRS-uB

La thermodynamique calculatoire : un précieux outil pour développer les matériaux du futur

L'âge de pierre, l'âge du cuivre, du fer, du bronze, ... comme si le progrès de l'humanité était scandé par la découverte des métaux et leur usage. De nos jours, le développement de la métallurgie reste central pour relever les défis sociétaux et s'inscrire dans un développement durable. De nouveaux procédés sont adoptés pour la fabrication de pièces métalliques afin de réduire les pertes de matière et diminuer le coût du produit final. Parallèlement, il est indispensable de concevoir de nouveaux matériaux versatiles et robustes, légers et durables, des matériaux intelligents, des matériaux pour l'énergie que ce soit pour les batteries, les panneaux solaires, ou les piles à combustible ... Cet effort passe par le design d'alliages innovants et par la conception de matériaux composites qui combinent les propriétés des éléments constitutifs. Pour répondre à la question : quel alliage pour quelle application, nous avons recours à la thermodynamique calculatoire. Cet outil nommé CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) permet de déterminer les phases d'équilibre pour un système donné à plusieurs composants, en fonction de la température. On peut l'utiliser en amont des expériences comme un outil prédictif ou en aval pour expliquer les microstructures observées en fonction des conditions d'élaboration. Depuis quelques années, le département PMDM s'est doté du logiciel Thermo-Calc®, dans le cadre du projet Pilot'HY (cofinancé par la région Bourgogne Franche-Comté et l'EUR EIPHI). Il permet de réaliser ces calculs thermodynamiques (diagrammes de phase, température de fusion, enthalpie de fusion, énergie libre, potentiel chimique, activité, ...) en utilisant des bases de données spécifiques à une famille d'alliages qui ont été acquises progressivement par les équipes sur des projets. Nous illustrerons le développement de cette activité au sein de PMDM sur quelques exemples représentatifs.

P8) Christophe FINOT, UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne

Enseigner l'énergie et ses multiples facettes aux étudiants de licence se destinant aux métiers de l'enseignement

L'énergie est un sujet à de très multiples facettes que les étudiants découvrent au lycée. Le premier cycle universitaire leur permet de consolider les bases conceptuelles, notamment à travers les modules de mécanique et de thermodynamique où ces notions sont généralement traitées de manière très académique et assez calculatoire. Nous avons introduit récemment en dernière année du cycle licence de Physique Chimie un module de 20h ayant entre autres l'objectif de replacer le thème de l'énergie dans un paysage sociétal plus large et notamment celui du développement durable. Une mise en perspective des aspects historiques, économiques, stratégiques est ainsi introduite pour mieux souligner la complexité de ce sujet particulièrement d'actualité. L'apport des travaux de Carnot ou encore ceux de Fourier trouvent alors une place toute particulière. Nous discuterons les choix que nous avons effectués pour cet enseignement.

4) Exposition



« **2023-2024 : Les bicentennaires Carnot, c'est aussi au Creusot. Des savants d'hier pour imaginer demain** ». Exposition temporaire organisée par l'Académie François Bourdon – Pavillon de l'Industrie, du 10 avril au 30 novembre 2024.

Le Conseil scientifique de l'Académie a souhaité participer aux commémorations nationales 2023 et 2024 en présentant une exposition CARNOT, mettant en valeur ses fonds d'archives. L'année 2023 est le bicentenaire de la mort de Lazare Carnot et 2024 celui de la publication du livre « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » de Sadi Carnot. Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (Nolay, 13 mai 1753- Magdebourg, 2 août 1823) fut à la fois révolutionnaire, poète, chef de guerre, scientifique, créateur de l'École polytechnique. Mathématicien et mécanicien, il a écrit *Essai sur les machines en général* (1786) et *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement* (1803). Nicolas-Léonard-Sadi Carnot (Paris, 1^{er} juin 1796 – Ivry-sur-Seine, 24 août 1832), après des études à Polytechnique et une carrière militaire assez décevante, se consacre à ses études de physique sur les machines à vapeur. Il pose dans son ouvrage les bases de ce qui s'appellera la thermodynamique, science utilisée dans tous les domaines de l'énergie. Un livret-catalogue enrichi, reprenant et approfondissant les thématiques clés de l'exposition, vient en pérenniser le contenu.