

What is Green Chemistry?

Quand John C. Warner inspire la nouvelle génération

Grégory CHATEL et Dominique AGUSTIN

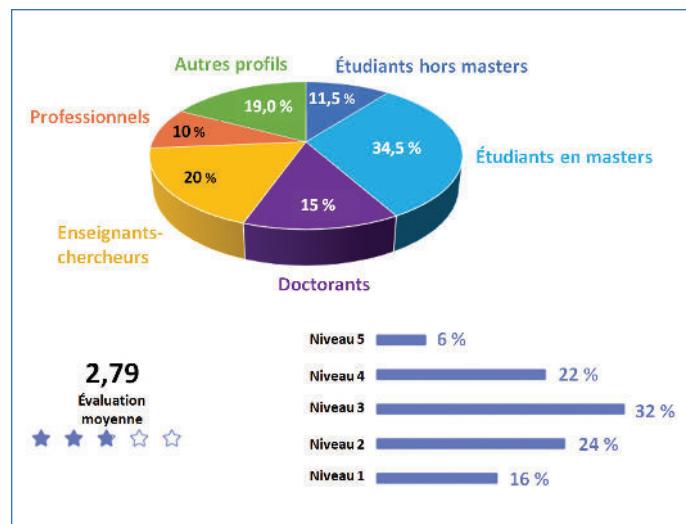
Le 9 octobre 2025, la Chimie Verte Academy et la division Chimie durable de la Société Chimique de France (SCF) ont organisé un webinaire exceptionnel avec le Professeur John C. Warner, co-fondateur avec Paul T. Anastas des douze principes de la chimie verte. Devant plusieurs centaines de participants connectés en direct, John C. Warner a partagé sa vision d'une chimie responsable, inspirante et tournée vers les jeunes générations. Retour sur un moment fort, entre science et conscience.

John C. Warner, une figure fondatrice tournée vers l'action

Co-auteur, avec Paul T. Anastas, des douze principes qui ont façonné les contours de la chimie verte [1], John C. Warner conjugue depuis près de quarante ans invention, transfert vers l'industrie et engagement éducatif. Son parcours est jalonné d'innovations transférées dans le milieu industriel, de collaborations internationales et d'un travail de diffusion pédagogique porté sans relâche, notamment via *Beyond Benign*, organisation qu'il a cofondée pour intégrer la chimie verte dans les programmes de formation [2]. D'emblée, il replace la chimie verte au cœur d'un paysage plus vaste (économie circulaire, biomimétique, *Safe and Sustainable by Design* (SSbD), Objectifs de développement durable des Nations unies (ODD) [3], pensée systémique), non pas pour dresser des frontières entre ces différents concepts, mais pour affirmer des complémentarités. Selon lui, notre époque souffre moins d'un déficit d'objectifs que d'un manque de « *Comment faire ?* » : au-delà du « *Pourquoi faire ?* » et du « *Quoi faire ?* », il faut nommer, enseigner et outiller le « *Comment faire ?* » en repartant des mécanismes (moléculaires et matériaux) pour concevoir des technologies intrinsèquement compatibles avec le vivant et accélérer leur passage du laboratoire au produit.

Un rendez-vous très suivi, au carrefour des campus, des laboratoires et des entreprises

Le format en anglais se prêtait à une audience élargie. Ainsi, le 9 octobre, de 18 h à 19 h (heure française), près de 400 personnes se sont connectées en direct, tandis que plus



Profil des participants au webinaire (en haut) et niveau de connaissance en chimie verte évalué par les participants (de une étoile : pas de connaissance, à cinq étoiles : expert sur le sujet) (en bas).

de 400 autres ont demandé à recevoir le lien vers le replay [4], faute de pouvoir assister à la diffusion. Les profils des auditeurs attestent d'une réelle pluralité générationnelle et professionnelle : 46 % d'étudiants (dont les trois quarts en master), 15 % de doctorants, 20 % d'enseignants-chercheurs, 10 % de professionnels du monde industriel, le solde relevant de la catégorie « autres profils ». Fait intéressant, l'autoévaluation moyenne du niveau de connaissance en chimie verte de l'auditoire s'établit à 2,79/5, signe d'un public curieux et déjà formé, mais conscient d'avoir encore à apprendre (voir figure).

Chimie Verte Academy & Division Chimie Durable (SCF) Exclusive Joint Webinar



Professor Dr. John C. WARNER

What is Green Chemistry? A journey through its meaning, impact and future

October 9th, 2025

Concernant le lien de l'auditoire à la Société Chimique de France, 24 % des répondants déclarent en être membres, 60 % non, et 16 % « *pas encore* ». Dès l'introduction du webinaire, Dominique Agustin, membre du Bureau de la division Chimie durable [5] et représentant SCF au sein de la Chimie Verte Academy, a rappelé le rôle et les missions de la SCF : mise en réseau des divisions scientifiques et des sections régionales, valorisation par les prix et distinctions, soutien aux étudiants, organisation d'événements (dont les Journées de la Chimie Durable [6]), et plus largement, animation d'une communauté scientifique vivante depuis plus d'un siècle et demi.

La Chimie Verte Academy [7], pour sa part, demeure encore en cours de découverte pour une partie du public : 35% affirment la connaître, 39 % non, et 26 % « *en avoir entendu parler sans bien la connaître* ». La dynamique n'en est pas moins prometteuse : la Chimie Verte Academy, projet « Compétences et Métiers d'Avenir » (CMA) financé par France 2030 et lancé en décembre dernier (voir [8]), fédère cinq universités (Poitiers, Strasbourg, Picardie Jules Verne, Savoie Mont Blanc et Toulouse) disposant chacune d'un master en chimie verte, ainsi que des pôles de compétitivité, des campus des métiers et des qualifications d'excellence, des organisations professionnelles, des industriels et la SCF comme société savante partenaire. Sa gouvernance, équilibrée entre académie et industrie, vise explicitement à réaligner l'offre de formation avec les besoins réels des entreprises, tout en nourrissant la recherche et l'innovation par des allers-retours structurés, comme l'a rappelé Grégory Chatel, directeur de la Chimie Verte Academy.

Du cercle au pendule : une autre manière d'inventer

Au cœur de l'intervention, John C. Warner a proposé une image qui a fait mouche. Plutôt qu'un cercle parfait de la circularité, il invite à visualiser un pendule oscillant entre deux pôles : le monde construit par l'homme et le monde naturel. Extraction des ressources, transformations moléculaires, assemblage en matériaux et produits, usage et réemploi, désassemblage mécanique, retours éventuels au niveau moléculaire (dépolymérisation, réactions inverses), puis dégradation régénérative : à chaque étape, des pertes et fuites sont possibles, des coûts énergétiques s'accumulent, des verrous technologiques apparaissent. Notre responsabilité est double : réduire ce chevauchement entre les deux mondes et inventer des techniques qui permettent d'orienter, en connaissance de cause, la trajectoire de chaque matériau – réutilisation longue ou désassemblage, recyclage mécanique ou chimique, biodégradation programmée, etc. « *La Nature ne sépare pas l'assemblage et le désassemblage dans une cellule ; on construit et on déconstruit en même temps. Nous avons encore à imaginer des procédés où recycler et fabriquer cessent d'être deux bâtiments distincts.* »

« **Il faut réinventer notre manière d'inventer** »,
John C. Warner.

Cette manière de voir n'est pas qu'une métaphore. Elle commande une méthode : revenir aux mécanismes. Pour John C. Warner, un produit se définit par des propriétés (barrière

à l'oxygène, résistance thermique, adhésion...), elles-mêmes issues de mécanismes de matériaux (cristallinité, mobilité de chaînes, ...), eux-mêmes enracinés dans des mécanismes moléculaires (rotations de liaisons, interactions de van der Waals, motifs réactifs). En remontant la chaîne, on rend traçables les arbitrages de performance et de soutenabilité. En la redescendant, on conçoit des modules de Young molécules, des formulations et des architectures de matériaux qui intègrent la soutenabilité par conception. Dans cette perspective, ces dimensions – toxicité, inflammabilité, persistance, biodégradabilité, empreinte énergétique – ne sont pas des cases à cocher *a posteriori*, mais des exigences à intégrer dès la conception, au niveau des mécanismes.

Pour John C. Warner, le « *secret de la chimie verte* » n'alourdit pas la R&D, il l'accélère. En intégrant au plus tôt les contraintes de sécurité et d'environnement dans un procédé, on réduit les retours en arrière, on économise des cycles d'essais-erreurs et l'on rapproche l'invention du produit. Afin d'appuyer son raisonnement, il a pris comme exemple concret l'expérience de son propre laboratoire : des équipes modestes, des moyens comptés, mais des technologies éprouvées, des brevets nombreux et des transferts à l'échelle en deux à trois ans en moyenne. L'argument, ici, est moins moral que pragmatique : « *La chimie verte fait gagner du temps... et de la créativité.* »

IA, SSbD, évaluation : promesses, vigilance et honnêteté

Interrogé sur l'intelligence artificielle, John C. Warner a livré un message équilibré : indispensable et riche de potentialités pour relier mécanismes et propriétés, accélérer la génération d'hypothèses et explorer des espaces moléculaires immenses, l'IA ne doit pas être « *survendue* » au risque de décevoir, d'assécher des budgets et de susciter un contre-mouvement. « *Travailloons dur, intégrons-la honnêtement dans les processus d'invention, et elle deviendra ce qu'elle promet* », a-t-il résumé en substance.

Sur le *Safe and Sustainable by Design* (SSbD), sa réponse est tout aussi nuancée. Oui, la convergence est forte : la chimie verte, définie comme l'utilisation de principes pour éliminer ou réduire la production et l'usage de substances dangereuses lors de la conception, la fabrication et l'utilisation des produits chimiques, converge avec l'approche de « *sûr et durable par conception* ». Mais un point clé demeure : beaucoup des technologies manquent encore. On ne peut pas demander à l'industrie de « faire autrement » sans inventer le « comment faire autrement ». D'où l'intérêt d'orienter des programmes comme SSbD aussi vers les conditions de l'invention (formation, moyens, outils), et pas seulement vers la régulation et la mesure.

Justement, concernant les outils d'évaluation (toxicologie, analyse du cycle de vie – ACV, bilans énergétiques), il rappelle une évidence trop souvent oubliée : mesurer mieux ne suffit pas. « *Même le meilleur chronomètre du monde ne fera pas courir plus vite et ne remplace pas le besoin d'entraînement.* » En résumé, l'évaluation est indispensable, mais elle doit accompagner, et non se substituer à l'effort d'invention.

« **On ne peut pas demander à l'industrie de faire autrement si l'on n'a pas inventé le comment** »,
John C. Warner.



John C. Warner (à gauche) et Grégory Chatel (à droite) pendant le webinaire.

Un dialogue nourri avec le public

La séance de questions-réponses a confirmé l'appétit de concret d'un public très attentif. D'abord, l'énergie du recyclage : « *Tant que l'on sépare, dans deux lieux et dans deux temps, le désassemblage et la refabrication, on additionne les dépenses énergétiques* », a résumé John C. Warner. L'horizon, selon lui, n'est pas de proclamer une circularité idéale, mais d'imbriquer les opérations – récupérer, reconfigurer, refabriquer – pour capter mieux l'enthalpie... et l'entropie des flux, « *comme le fait la cellule qui construit et déconstruit en même temps.* » À la question voisine sur le retour d'un produit à ses « *composants principaux* », il a rappelé que tout dépend des mécanismes visés et des échelles : le bon geste n'est pas universel, il se choisit « *au cas par cas* », entre réemploi, désassemblage, recyclage et dégradation régénérative.

Interrogé sur les impacts immédiats, John C. Warner a cité le monde des matériaux et de l'emballage, où l'on peut agir dès aujourd'hui : barrières à l'oxygène et à la vapeur d'eau repensées, biopolymères moins dépendants d'additifs, formulations sobres en amont. Plutôt que d'empiler les « *solutions* », il met l'accent sur la formation : apprendre aux chimistes à concilier performance et soutenabilité parce que c'est là que réside le véritable effet multiplicateur.

Le passage du laboratoire au produit suscite de nombreuses réactions, notamment chez les étudiants et doctorants. Warner plaide pour des allers-retours plus étroits entre l'université et l'industrie et pour penser l'industrialisation elle-même : on ne transfère pas une équation, on conçoit un procédé, une ligne, des contrôles. En bref, l'alignement des intentions ne suffit pas ; il faut outiller l'invention du « *comment* » (formation, moyens, outils) tout en poursuivant régulation et évaluation.

Quant aux innovations émergentes, il refuse la tentation de la « *liste miracle* » : beaucoup de technologies manquent encore et restent à inventer et à mettre à l'échelle. D'où, à nouveau, l'enjeu de compétences qui relient mécanismes, propriétés et usages en gardant à l'esprit ce que ces solutions permettent déjà, et ce qu'elles ne permettent pas encore. Enfin, à propos du prix Nobel, la réponse est à l'image de l'homme : un sourire, beaucoup d'humilité et le mérite renvoyé à la communauté.

« *S'il devait y avoir un prix Nobel pour la chimie verte, il faudrait, pour la première fois, le donner à une centaine de personnes, tant elles sont nombreuses à faire des choses remarquables* », John C. Warner.

De l'inspiration à l'action

Ce qui demeure, après ce webinaire, c'est sans doute une tonalité : l'optimisme de l'action lucide. Oui, nous manquons encore de technologies. Oui, il faut mieux mesurer. Oui, il faut des passerelles plus efficaces vers l'industrie. Mais la clé est à notre portée : enseigner les mécanismes, dessiner des propriétés, construire des produits qui réduisent, en amont, la toxicité et l'empreinte, et surtout transmettre cette manière de faire aux nouvelles générations. Le succès du rendez-vous, la qualité des échanges et la diversité des profils le montrent : la chimie verte n'est plus un chapitre annexe, elle est une manière d'inventer.

Le replay du webinaire est disponible sur la chaîne YouTube de la Chimie Verte Academy [4]. Nous invitons les lectrices et lecteurs à le (re)voir, à le partager et à poursuivre le dialogue au sein des divisions de la SCF, dans les laboratoires, les salles de cours et au sein des entreprises. La transition est une œuvre collective ; elle se nourrit d'exigence, d'imagination et de gestes précis. C'est, au fond, ce que John C. Warner est venu nous rappeler avec cette énergie sereine qui donne envie de se mettre à la paillasse et d'ouvrir un nouveau cahier de laboratoire.

Notes et références

- [1] Paul T. Anastas, John C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford Academic, 2000, <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
- [2] www.beyondbenign.org
- [3] www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable
- [4] Replay de l'événement disponible sur YouTube : www.youtube.com/watch?v=9tmx1ZAgJvw
- [5] <https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/chimie-durable>
- [6] La 3^e Journée a lieu à Strasbourg le 21 novembre 2025 : <https://jcd2025.sciencesconf.org>
- [7] www.chimieverte-academy.fr
- [8] G. Chatel, L. Pirault-Roy, P. Vié, Retour sur le lancement de la Chimie Verte Academy, *L'Act. Chim.*, 2025, 501, p. 8-10, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/retour-sur-le-lancement-de-la-chimie-verte-academy-p8-n501>

Grégory CHATEL¹, directeur de la Chimie Verte Academy, maître de conférences HDR à l'Université Savoie Mont Blanc, responsable du master Chimie verte et éco-innovations, et **Dominique AGUSTIN**², vice-président de la division Chimie durable, professeur des universités à l'Université de Toulouse.

¹gregory.chatel@univ-smb.fr

²dominique.agustin@iut-tlse3.fr

Antwerp, Belgium

EuChemS kvcv