La molécule du mois : le translocon TOC-TIC

Publié le 05.05.25 | Par Janet Iwasa

Le grand supercomplexe TOC-TIC transporte les protéines dans le chloroplaste.

Grâce à leurs chloroplastes, les plantes et les algues convertissent l'énergie lumineuse solaire en énergie chimique, utilisée dans la synthèse de matière organique. Comme les mitochondries, les chloroplastes proviendraient de l'endosymbiose d'une cellule bactérienne par une cellule eucaryote primitive[1]. Bien que les chloroplastes et les mitochondries modernes possèdent leur propre génome circulaire, la majorité des protéines nécessaires au fonctionnement de ces organites est codée par le génome nucléaire. Sur les 3 000 protéines environ présentes dans le chloroplaste, seule une centaine peuvent être synthétisées directement dans l'organite, à partir de son propre génome. La majeure partie du protéome plastidial restant est traduite dans le cytosol et importée dans le chloroplaste par l'intermédiaire du supercomplexe TOC-TIC.

1. Franchir plusieurs compartiments

Les chloroplastes sont constitués de plusieurs compartiments délimités par des membranes. La membrane externe enveloppe l'ensemble du chloroplaste. À l'intérieur du chloroplaste se trouve une membrane interne qui entoure le stroma, un grand compartiment qui contient les structures photosynthétiques, les ribosomes du chloroplaste et de l'ADN. Entre les membranes interne et externe du chloroplaste se trouve un petit espace intermembranaire. Le passage des protéines à travers la membrane externe est assuré par le complexe TOC (*Translocon at the Outer envelope of Chloroplasts* en anglais), tandis que le passage à travers la membrane interne est contrôlé par le complexe TIC (*Translocon at the Inner envelope of Chloroplasts* en anglais). Des études structurales récentes chez l'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii* ont montré que les complexes TOC et TIC forment un grand supercomplexe unique TOC-TIC [1], comme représenté sur la figure 1 (entrée de la banque de données des protéines (PDB) 7VCF). Ce supercomplexe transporterait aussi bien des protéines du cytosol au stroma que dans l'espace intermembranaire [2].

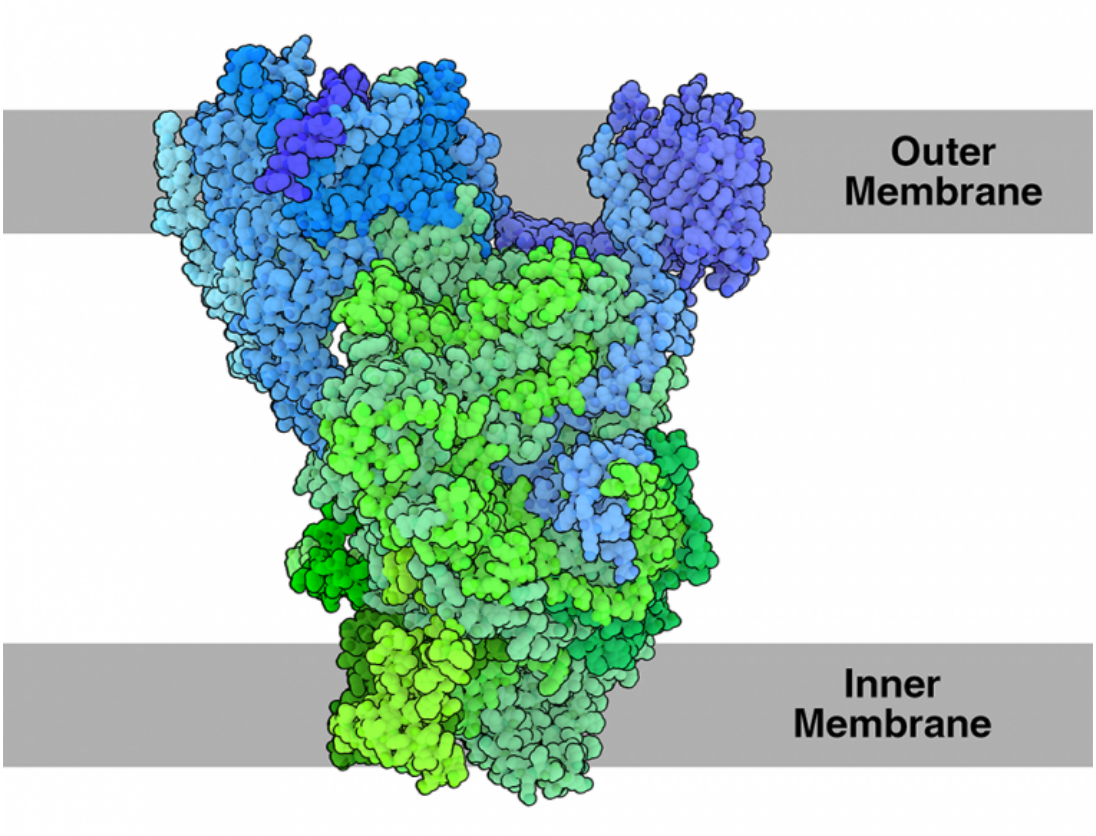


Figure 1 - Le translocon TOC-TIC de *Chlamydomonas reinhardtii* (entrée PDB 7VCF)
Les protéines du complexe TOC sont représentées en bleu, tandis que celles du complexe TIC sont représentées en vert.

Auteur(s)/Autrice(s) : Janet Iwasa et RCSB PDB – Licence : CC-BY – Source : RCSB PDB

2. Tirer les protéines vers l'intérieur

Des études biochimiques ont montré que l'importation de protéines depuis le cytosol vers le stroma du chloroplaste est un processus énergivore qui peut nécessiter l'hydrolyse de centaines de molécules d'ATP par protéine. Une grande partie de cette énergie est probablement utilisée par les complexes moteurs qui s'associent au translocon TOC-TIC et qui tirent les protéines dans le stroma [3]. L'un de ces complexes moteurs a récemment été caractérisé chez *Chlamydomonas reinhardtii* [4]. Le complexe Ycf2-FtsHi, représenté sur la figure 2 en rose/violet (entrée PDB 8XQX) est un grand complexe transmembranaire à plusieurs sous-unités présent dans la membrane interne du chloroplaste. Six des protéines qui le composent forment un anneau hexamérique qui tirerait les protéines à travers le canal central formé en utilisant l'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP [5].

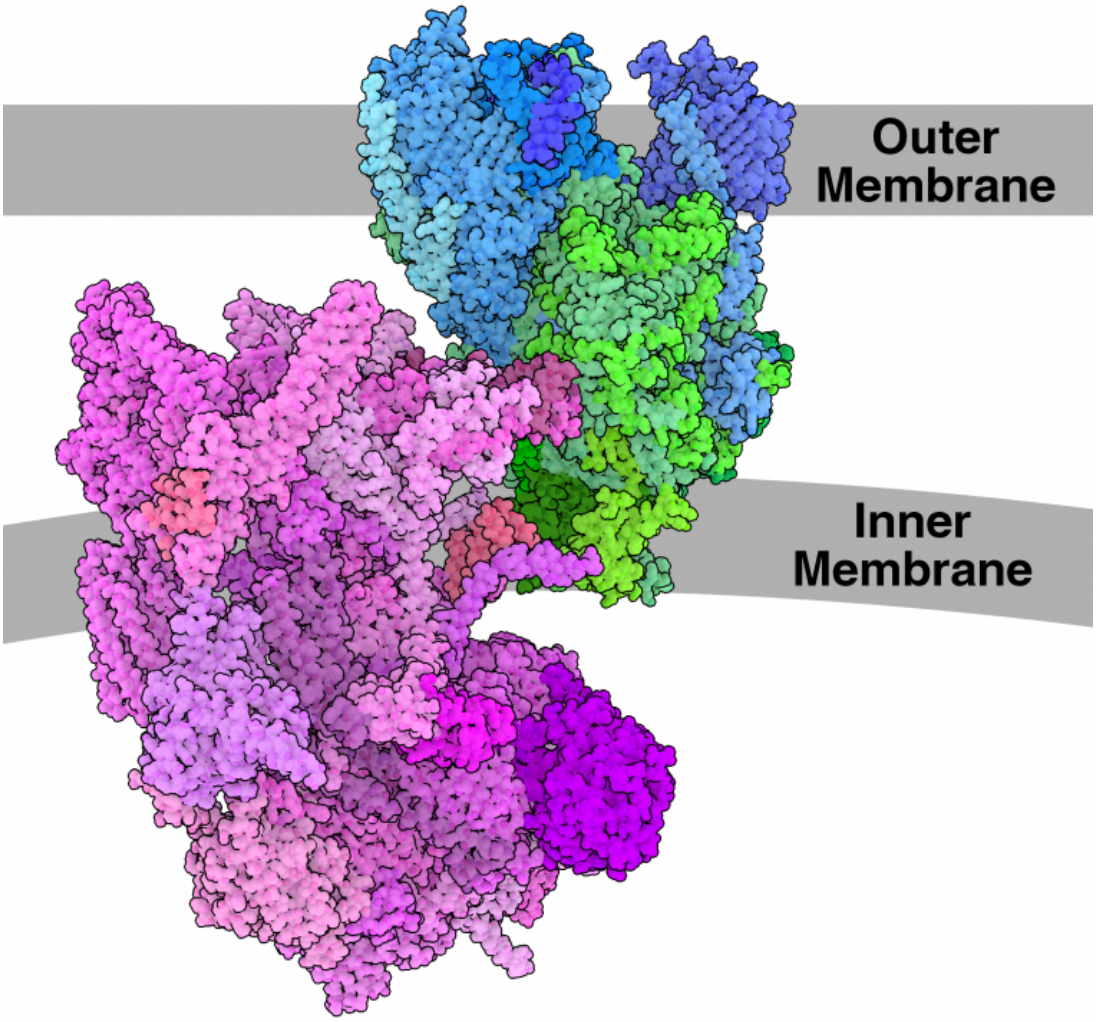


Figure 2 - Le complexe Ycf2-FtsHi (représenté en rose/violet, entrée PDB 8XQX) arrimé au translocon TOC-TIC (représenté en en bleu/vert).

Auteur(s)/Autrice(s) : Janet Iwasa et RCSB PDB – Licence : CC-BY – Source : RCSB PDB

3. Comparaison des tonneaux β des complexes TOC et BAM1

Le grand canal central du complexe TOC est un tonneau β hybride formé entre deux protéines Toc (Toc75 et Toc120/Toc90). Dans sa plus grande largeur, ce canal mesure environ 20 angströms (2 nm), ce qui est suffisant pour le passage de certaines protéines repliées. La structure du tonneau β du complexe TOC présente des similitudes frappantes avec un tonneau β trouvé dans un complexe protéique, appelé BamA, d'une bactérie à Gram négatif (entrée PDB 6V05). Cela suggère que le canal du TOC pourrait avoir pour origine une protéine membranaire bactérienne [6]. Vous pouvez comparer la structure des tonneaux β des complexes TOC et BamA en utilisant par exemple le logiciel de visualisation de molécules disponible sur le site PDB-101.

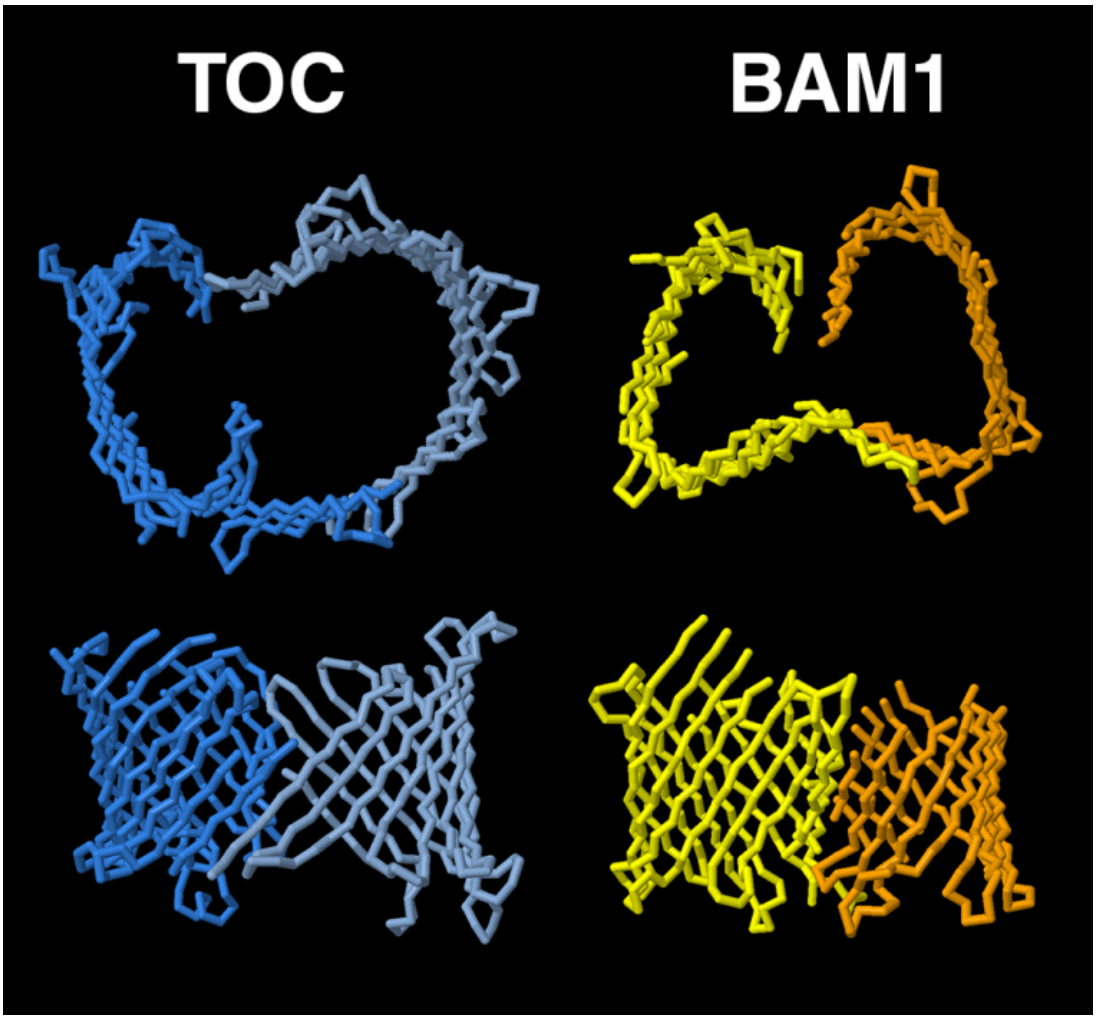


Figure 3 - La structure en tonneau β du complexe TOC, représenté en bleu, et du complexe BAM1, représenté en jaune et orange

Auteur(s)/Autrice(s) : Janet Iwasa et RCSB PDB – Licence : CC-BY – Source : RCSB PDB

4. Pour aller plus loin

Il existe de nombreux autres complexes protéiques qui forment des complexes hexamériques capables de déplacer des peptides dans leur canal central. Vous pouvez retrouver deux articles à ce sujet comme un ancien article de la molécule du mois Molecule of the Month : AAA+ Proteases ou cet autre article traduit de la molécule du mois : La molécule du mois : le complexe PTEX de l'agent du paludisme.

Ce texte correspond à la traduction par Cédric Bordi de l'article Molecule of the Month : TOC TIC Translocon **[7]** écrit par Janet Iwasa et paru en mai 2025 sur le site PDB-101, le portail éducatif de la banque de données sur les protéines (PDB). La note de bas de page constitue un ajout du traducteur.

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Janet Iwasa

Janet Iwasa est professeure assistante au département de biochimie de l'université de l'Utah (États-Unis). Elle est spécialiste de la création d'images et d'animations permettant de rendre compte des processus biologiques.

PARTENAIRE(S)

Cet article est publié en partenariat avec le site PDB-101, le portail éducatif de la banque de données sur les protéines (PDB).
PDB-101

NOTES

1 Pour en savoir plus sur les événements d'endosymbioses à l'origine des chloroplastes, voir l'article *Les endosymbioses dans l'histoire évolutive des Eucaryotes*.

BIBLIOGRAPHIE

1 Liu, H. ., Li, A. ., Rochaix, J.-D. ., & Liu, Z. . (2023). Architecture of chloroplast TOC-TIC translocon supercomplex. *Nature, 615*, 349–357. http://doi.org/10.1038/s41586-023-05744-y (Original work published 2026)

2 Jin, Z. ., Wan, L. ., Zhang, Y. ., Li, X. ., Cao, Y. ., Liu, H. ., … Yan, Z. . (2022). Structure of a TOC-TIC supercomplex spanning two chloroplast envelope membranes. *Cell, 185*, 4788–4800. http://doi.org/10.1016/j.cell.2022.10.030 (Original work published 2026)

3 Shi, L.-X. ., & Theg, S. M. (2013). Energetic cost of protein import across the envelope membranes of chloroplasts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110*, 930–935. http://doi.org/10.1073/pnas.1115886110 (Original work published 2026)

4 Wang, N. ., Xing, J. ., Su, X. ., Pan, J. ., Chen, H. ., Shi, L. ., … Li, M. . (2024). Architecture of the ATP-driven motor for protein import into chloroplasts. *Molecular Plant, 17*, 1702–1718. http://doi.org/10.1016/j.molp.2024.09.010 (Original work published 2026)

5 Liang, K. ., Zhan, X. ., Li, Y. ., Yang, Y. ., Xie, Y. ., Jin, Z. ., … Yan, Z. . (2024). Conservation and specialization of the Ycf2-FtsHi chloroplast protein import motor in green algae. *Cell, 187*, 5638–5650. http://doi.org/10.1016/j.cell.2024.08.002 (Original work published 2026)

6 Tomasek, D. ., Rawson, S. ., Lee, J. ., Wzorek, J. S., Harrison, S. C., Li, Z. ., & Kahne, D. . (2020). Structure of a nascent membrane protein as it folds on the BAM complex. *Nature, 583*, 473–478. http://doi.org/10.1038/s41586-020-2370-1 (Original work published 2026)

7 Iwasa, J. . (2025). TOC-TIC Translocon. *RCSB Protein Data Bank*. http://doi.org/10.2210/rcsb_pdb/mom_2025_5 (Original work published 2026)