

Rétinal

Gemini

Question : Modèles moléculaires du rétinal

Voici mon plan pour aborder ce sujet. Faites-moi savoir si vous avez besoin que j'y apporte des modifications.

Rétinal : Modèles Moléculaires et Vision

Faire des recherches sur des sites Web

- (1) Rechercher la définition et la structure chimique du rétinal.
- (2) Identifier les différents types de modèles moléculaires qui peuvent être utilisés pour représenter le rétinal (par exemple, modèles 3D, modèles informatiques, etc.).
- (3) Rechercher des articles scientifiques ou des ressources académiques qui décrivent ou utilisent des modèles moléculaires du rétinal dans le cadre de recherches.
- (4) Trouver des représentations visuelles ou des modèles 3D interactifs du rétinal et de ses différentes formes isomères (*cis* et *trans*).
- (5) Rechercher des informations sur les logiciels ou les outils utilisés pour la modélisation moléculaire du rétinal.
- (6) Examiner comment les modèles moléculaires aident à comprendre les propriétés et les fonctions du rétinal, notamment son rôle dans la vision.
- (7) Rechercher des études comparatives entre différents modèles moléculaires du rétinal et leurs avantages ou inconvénients respectifs.

Analyser des résultats

Créer un rapport

Prêt dans quelques minutes

Modèles Moléculaires du Rétinal : Structure, Applications et Analyse Comparative

Introduction

Le rétinal, également connu sous le nom de rétinaldéhyde ou rétinène, est un chromophore polyénique fondamental dans le processus de phototransduction visuelle.¹ Lié à des protéines appelées opsines, le rétinal constitue la base chimique de la détection de la lumière, l'étape initiale de la perception visuelle.¹ Comprendre la structure tridimensionnelle et le comportement du rétinal est essentiel pour décrypter les mécanismes complexes de la vision. Les modèles moléculaires jouent un rôle crucial dans cette compréhension, en permettant la visualisation et l'analyse des arrangements atomiques et des interactions moléculaires qui définissent la fonction du rétinal.³ Ce rapport explorera la structure moléculaire du rétinal et de ses isomères, les différents types de modèles moléculaires utilisés pour leur étude, leurs applications dans la recherche, les visualisations 3D disponibles, ainsi qu'une analyse comparative des systèmes de modèles rétiniens.

La Structure Moléculaire du Rétinal et ses Isomères

Le rétinal, de formule moléculaire C₂₀H₂₈O, est un dérivé aldéhyde de la vitamine A. Sa structure chimique se caractérise par un cycle cyclohexène et une chaîne latérale polyénique comportant une alternance de liaisons doubles et simples.⁸ Ce système de liaisons conjuguées est responsable de la capacité du rétinal à absorber la lumière dans le spectre visible, lui conférant son rôle de chromophore.¹

En raison de la rotation restreinte autour des doubles liaisons de la chaîne polyénique, le rétinal existe sous différentes formes isomères *cis-trans*.¹ La géométrie autour de ces doubles liaisons influence considérablement la forme globale et les propriétés du rétinal, affectant ainsi sa liaison aux opsines et son rôle dans le cycle visuel. L'isomère clé impliqué dans le cycle visuel est le 11-*cis*-rétilal. Lors de l'absorption d'un photon, il subit une photoisomérisation pour se transformer en all-*trans*-rétilal.¹² Cette isomérisation spécifique est l'événement moléculaire primaire de la détection de la lumière, convertissant l'énergie lumineuse en un signal biologique. D'autres isomères, tels que le 13-*cis*-rétilal et le 9-*cis*-rétilal, existent également et peuvent jouer des rôles dans différents contextes biologiques ou agir comme des compétiteurs ou des analogues.¹² L'existence de multiples isomères suggère un potentiel de régulation fine des processus biologiques ou le développement d'agents thérapeutiques basés sur ces variations structurales.

Le tableau suivant résume les principaux isomères du rétinal, leurs noms IUPAC, leurs notations SMILES et leurs rôles principaux :

Isomère du Rétinal	Nom IUPAC	SMILES	Rôle Principal
All-trans-rétinal	(2E,4E,6E,8E)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C/C(=C/C=C/C(=C/C=O)/C)/C.	Produit de la photoisomérisation du 11-cis-rétinal dans le cycle visuel. ¹
11-cis-rétinal	(2E,4Z,6E,8E)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C/C(=C/C=C\C(=C\C=O)\C)/C.	Chromophore photosensible dans les pigments visuels, subit une isomérisation lors de l'absorption de la lumière. ¹⁴
13-cis-rétinal	(2Z,4E,6E,8E)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C/C(=C/C=C/C(=C\C=O)/C)/C.	Métabolite humain, peut avoir des rôles biologiques différents. ¹⁸
9-cis-rétinal	(2E,4E,6Z,8E)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C/C(=C\C=C\C(=C\C=O)\C)/C.	Peut se lier à l'opsine et former des pigments visuels alternatifs. ²⁰
All-cis-rétinal	(2Z,4Z,6Z,8Z)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C\C(=C/C=C\C(=C/C=O)\C)\C.	Isomère où toutes les doubles liaisons exocycliques ont une géométrie Z (cis). ¹⁷
7-cis-rétinal	(2E,4E,6E,8Z)-3,7-diméthyl-9-(2,6,6-triméthylcyclohexén-1-yl)nona-2,4,6,8-tétrénal	CC1=C(C(CCC1)(C)C)/C=C\C(=C\C=C\C(=C\C=O)\C)\C.	Isomère moins courant. ¹⁹

Types de Modèles Moléculaires Employés pour le Rétinal

Divers types de modèles moléculaires sont utilisés pour représenter le rétinal, chacun mettant l'accent sur différents aspects de sa structure.

Les **modèles boule-bâton** représentent les atomes par des boules colorées et les liaisons chimiques par des bâtons, illustrant la connectivité entre les atomes et les angles de liaison.³ Différentes couleurs sont conventionnellement utilisées pour représenter les éléments (par exemple, carbone en noir, hydrogène en blanc, oxygène en rouge, azote en bleu).⁴ Ces modèles sont efficaces pour visualiser la structure 3D et la connectivité du rétinal, facilitant la compréhension de sa forme globale et de l'arrangement de ses atomes.

Les **modèles espace-remplissant** illustrent l'occupation spatiale des atomes en fonction de leurs rayons de van der Waals, offrant une représentation plus réaliste de la taille et de la forme de la molécule, ainsi que de la manière dont elle pourrait interagir avec d'autres molécules.³ Ces modèles sont particulièrement utiles pour comprendre les interactions stériques et comment le rétinal pourrait s'insérer dans la poche de liaison d'une protéine opsine.

Les **modèles squelettiques** (ou formules en zigzag) fournissent une représentation simplifiée du squelette carboné, les atomes d'hydrogène étant souvent implicites, ce qui facilite le dessin et la visualisation de molécules

plus grandes comme le rétinal.³ Ces modèles sont efficaces pour représenter la structure de base du rétinal et mettre en évidence ses groupes fonctionnels et ses doubles liaisons, qui sont cruciaux pour sa réactivité et sa fonction.

Les **modèles générés par ordinateur** utilisent des logiciels de chimie computationnelle pour créer des modèles statiques et dynamiques du rétinal.⁷ Ces modèles permettent l'étude de ses propriétés électroniques, des changements conformationnels (comme la photoisomérisation) et des interactions avec les protéines grâce à des techniques telles que la mécanique moléculaire et la mécanique quantique. Des outils logiciels comme ChemDoodle 3D, Avogadro et Schrödinger sont utilisés à cette fin.³⁵ Les modèles générés par ordinateur offrent un outil puissant pour une analyse approfondie des propriétés et du comportement du rétinal au niveau atomique, y compris des simulations de processus dynamiques difficiles à étudier avec des modèles physiques seuls.

Applications de la Modélisation Moléculaire dans la Recherche sur le Rétinal

La modélisation moléculaire est un outil indispensable dans la recherche sur le rétinal, avec de nombreuses applications.

Elle permet d'étudier l'interaction du rétinal avec les protéines opsines dans les pigments visuels (par exemple, la rhodopsine), y compris la formation d'une liaison base de Schiff et les changements conformationnels de la protéine déclenchés par l'isomérisation du rétinal.¹² La modélisation moléculaire permet aux chercheurs de visualiser et de quantifier les interactions précises entre le rétinal et l'opsine, ce qui est essentiel pour comprendre le mécanisme de la phototransduction et le réglage de la sensibilité à la lumière dans différentes cellules photoréceptrices.

Elle est également utilisée pour étudier le mécanisme de photoisomérisation du 11-cis-rétinal lors de l'absorption de lumière, y compris l'excitation des électrons dans le système conjugué et la rotation autour de la double liaison C11-C12.¹² Les modèles computationnels peuvent simuler la dynamique de ce processus ultra-rapide, fournissant des informations sur le paysage énergétique et les facteurs qui influencent l'efficacité et la spécificité de la photoisomérisation.

De plus, les modèles moléculaires sont utilisés dans la découverte et la conception de médicaments ciblant les voies ou les maladies liées au rétinal (par exemple, la rétinite pigmentaire, la dégénérescence maculaire), comme la conception de composés qui entrent en compétition avec la liaison du rétinal ou stabilisent des conformations protéiques spécifiques.⁵ En comprenant la base moléculaire de la fonction du rétinal et son implication dans les maladies, les chercheurs peuvent utiliser la modélisation moléculaire pour concevoir et cibler des molécules thérapeutiques potentielles qui interagissent avec le rétinal ou ses protéines associées.

Des études de recherche spécifiques illustrent l'utilisation de la modélisation moléculaire du rétinal, comme les travaux de Karplus sur la modélisation du changement de forme du rétinal¹⁴ et les études sur les isomères du rétinal dans la bacteriorhodopsine.²⁹ Ces exemples démontrent l'utilisation historique et continue de la modélisation moléculaire pour aborder des questions fondamentales sur la structure et la fonction du rétinal dans divers systèmes biologiques.

Visualisation 3D et Modèles Interactifs du Rétinal

Les données structurales 3D pour les isomères du rétinal sont disponibles dans des bases de données telles que PubChem.⁸ Ces informations peuvent être visualisées en 3D, facilitant la recherche et l'éducation sur le rétinal. Des modèles 3D interactifs sont également disponibles en ligne (par exemple, Sketchfab, NIH 3D Print Exchange) à des fins éducatives et de recherche, y compris des modèles de cellules photoréceptrices contenant du rétinal et des couches rétiniennes.⁵⁵ Ces modèles interactifs permettent une exploration dynamique de la structure du rétinal et de son environnement cellulaire, améliorant la compréhension et facilitant la communication de concepts complexes.

Des outils logiciels (par exemple, ChemDoodle 3D, Avogadro, ChemSketch) sont utilisés pour visualiser et manipuler les modèles moléculaires du rétinal, permettant la rotation, le zoom et l'analyse des longueurs et des angles de liaison.³⁵ Ces logiciels spécialisés fournissent aux chercheurs les outils nécessaires non seulement pour visualiser mais aussi pour analyser et modifier les modèles moléculaires du rétinal, permettant des investigations détaillées.

Analyse Comparative des Systèmes de Modèles Rétiniens

Différents modèles expérimentaux et computationnels sont utilisés pour étudier la rétine, y compris le rétinal.

Les **modèles *in vitro*** comprennent les cultures cellulaires (par exemple, les cellules 661W, les cellules de rétinoblastome Y-79), les explants rétiniens et les organoïdes rétiniens dérivés de cellules souches pluripotentes induites (iPSC).⁴⁶ Les modèles *in vitro* offrent des environnements contrôlés pour étudier les cellules rétiniennes

et leurs réponses aux stimuli ou aux médicaments, mais peuvent manquer de la complexité de l'organisme entier. Les organoïdes rétiniens, cependant, sont de plus en plus sophistiqués pour imiter la structure en couches et les types cellulaires de la rétine.

Les **modèles *in vivo*** comprennent les modèles animaux comme les souris (y compris les souris rd10 et les souris mutantes pour la rhodopsine), les rats (y compris les rats Pde6b-knockout et les modèles de lésion d'ischémie-reperfusion), les lapins et même les toupayes.⁴⁷ Les modèles animaux permettent l'étude des processus rétiniens dans le contexte d'un organisme vivant entier, y compris les effets systémiques, mais ils peuvent ne pas reproduire parfaitement la physiologie humaine et la progression de la maladie.

Les **modèles computationnels** comprennent les simulations de dynamique moléculaire, les simulateurs rétiniens et la modélisation pharmacocinétique/pharmacodynamique (PK/PD).³⁷ Les modèles computationnels peuvent simuler des processus biologiques complexes et prédire le comportement du rétinial et des molécules apparentées dans diverses conditions, offrant des informations difficiles, voire impossibles, à obtenir par des méthodes expérimentales seules.

Le choix du système de modèle dépend de la question de recherche spécifique, et les chercheurs doivent examiner attentivement les forces et les faiblesses de chaque approche pour garantir la validité et la pertinence de leurs résultats.⁵³ Aucun modèle unique ne reproduit parfaitement la rétine humaine.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des différents systèmes de modèles rétiniens :

Système de Modèle	Avantages	Inconvénients
Cultures Cellulaires	Faciles à manipuler, peu coûteuses, composition cellulaire relativement homogène, idéales pour le criblage de médicaments. ⁴⁹	Manquent de la complexité de la rétine <i>in vivo</i> , peuvent ne pas exprimer tous les marqueurs des photorécepteurs matures. ⁴⁹
Explants Rétiniens	Maintiennent l'architecture et les types cellulaires de la rétine pendant une courte période, utiles pour étudier les effets des médicaments sur le tissu rétinien. ⁵⁹	Stabilité limitée dans le temps (2-3 semaines), manque d'apport sanguin et d'interactions systémiques. ⁵⁹
Organoïdes Rétiniens	Mimétisme de la structure en couches et des types cellulaires de la rétine humaine, permettent d'étudier le développement rétinien et les maladies avec un génome patient-spécifique. ⁴⁶	Processus de culture laborieux et coûteux, peuvent ne pas contenir tous les types cellulaires ou avoir une vascularisation complète, la couche des cellules ganglionnaires peut dégénérer. ⁶¹
Modèles Murins	Peu coûteux, faciles à manipuler génétiquement, nombreux modèles de dégénérescence rétinienne disponibles. ⁶⁰	La rétine murine ne possède pas de macula, différences dans l'anatomie rétinienne et les types de photorécepteurs par rapport à l'humain. ⁶⁵
Modèles de Rats	Certaines similitudes dans la vascularisation rétinienne avec l'humain, modèles pour étudier l'ischémie-reperfusion. ⁹	Différences anatomiques avec la rétine humaine. ⁶⁰
Autres Modèles Animaux	Les lapins ont de grands yeux utiles pour les études pharmacocinétiques, les toupayes ont une vision diurne et une structure rétinienne plus proche de l'humain. ⁶⁰	Puissent être plus coûteux ou plus difficiles à manipuler génétiquement que les rongeurs, nécessitent une expertise spécifique. ⁶⁰

Modèles Computationnels	Permettent de simuler des processus complexes, d'étudier les propriétés électroniques et les interactions moléculaires, utiles pour la conception de médicaments. ⁷³	Nécessitent des connaissances spécialisées en chimie computationnelle et en bio-informatique, la précision dépend de la qualité des données d'entrée et des algorithmes utilisés. ⁷³
-------------------------	---	---

Conclusion

Les modèles moléculaires du rétinal, sous leurs diverses formes, sont des outils essentiels pour comprendre la structure, la fonction et le comportement de cette molécule cruciale dans la vision. De la visualisation de sa géométrie isomérique à la simulation de ses interactions avec les protéines et de sa photoisomérisation, ces modèles fournissent des informations inestimables. Ils jouent un rôle fondamental dans l'avancement de notre compréhension du processus visuel et dans le développement de stratégies thérapeutiques pour les maladies rétiennes.

L'avenir de la modélisation moléculaire du rétinal s'oriente vers le développement de modèles *in vitro* plus sophistiqués qui reproduisent mieux la complexité de la rétine humaine, l'utilisation croissante de la modélisation computationnelle pour la découverte de médicaments et les efforts continus pour élucider les mécanismes moléculaires précis qui sous-tendent la fonction et les maladies rétiennes. Ces avancées promettent d'accélérer la recherche et de conduire à de nouvelles thérapies pour les affections rétiennes.

Sources des citations

1. en.wikipedia.org, consulté le mai 3, 2025,
[https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal#:~:text=Retinal%20\(also%20known%20as%20retinaldehyde,All%2Dtrans%20Retinal](https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal#:~:text=Retinal%20(also%20known%20as%20retinaldehyde,All%2Dtrans%20Retinal)
2. en.wikipedia.org, consulté le mai 3, 2025,
[https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal#:~:text=Retinal%20\(also%20known%20as%20retinaldehyde,of%20visual%20Perception%20\(vision\).](https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal#:~:text=Retinal%20(also%20known%20as%20retinaldehyde,of%20visual%20Perception%20(vision).)
3. Types of Molecular Models | Whipple Museum, consulté le mai 3, 2025,
<https://www.whipplemuseum.cam.ac.uk/explore-whipple-collections/models/modelling-chemistry/types-molecular-models>
4. Molecular Models | ChemTalk, consulté le mai 3, 2025, <https://chemistrytalk.org/molecular-models/>
5. Molecular Models: Unveiling the Hidden Architecture of Molecules - Klinger Educational, consulté le mai 3, 2025, <https://klingereducational.com/pages/molecular-models>
6. Molecular model - Wikipedia, consulté le mai 3, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_model
7. Chem 351: Molecular models, consulté le mai 3, 2025,
https://www.chem.ucalgary.ca/courses/351/laboratory/351expt_04_models.pdf
8. Retinal | C20H28O | CID 638015 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Retinal>
9. Retinal | C20H28O - ChemSpider, consulté le mai 3, 2025, <https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.1041.html>
10. pubchem.ncbi.nlm.nih.gov, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1070#:~:text=Retinal%20is%20an%20enal%20that,of%20retinals%20and%20an%20enal.>
11. a Retinal | C20H28O | CID 1070 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1070>
12. Retinal - Wikipedia, consulté le mai 3, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal>
13. CHEBI:17898 - all-trans-retinal - EMBL-EBI, consulté le mai 3, 2025,
<https://www.ebi.ac.uk/chebi/searchId.do?chebid=CHEBI:17898>
14. Retinal | biochemistry - Britannica, consulté le mai 3, 2025, <https://www.britannica.com/science/retinal>
15. About the Retina, consulté le mai 3, 2025, <https://www.sas.upenn.edu/~scottds/vision/vischem.htm>
16. 11-cis-Retinal | C20H28O | CID 5280490 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11-cis-Retinal>
17. All-cis-retinal | C20H28O | CID 12227259 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/12227259>
18. 13-cis-Retinal | C20H28O | CID 6436079 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/13-cis-Retinal>
19. 7-cis-Retinal | C20H28O | CID 11426127 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7-cis-Retinal>
20. 9-Cis-Retinal | C20H28O | CID 6436082 - PubChem, consulté le mai 3, 2025,
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6436082>

21. Retinoids in the visual cycle: role of the retinal G protein-coupled receptor - PubMed Central, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7910522/>
22. Cis-Trans Isomerization of Retinal - Chemistry LibreTexts, consulté le mai 3, 2025, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Biological_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Biological_Chemistry\)/Photoreceptors/Chemistry_of_Vision/Cis-Trans_Isomerization_of_Retinal](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Biological_Chemistry/Supplemental_Modules_(Biological_Chemistry)/Photoreceptors/Chemistry_of_Vision/Cis-Trans_Isomerization_of_Retinal)
23. Retinal, consulté le mai 3, 2025, https://www.chm.bris.ac.uk/~paulmay/misc/motm/retinal/retinal_text.htm
24. 15.3: Vision - Chemistry LibreTexts, consulté le mai 3, 2025, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_\(Chang\)/15%3A_Photochemistry_and_Photobiology/15.03%3A_Vision](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_(Chang)/15%3A_Photochemistry_and_Photobiology/15.03%3A_Vision)
25. The Visual Cycle - photobiology.info, consulté le mai 3, 2025, <http://photobiology.info/Crouch.html>
26. Chemical structures of 11-cis retinal and its competitors. (A) Retinal... - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structures-of-11-cis-retinal-and-its-competitors-A-Retinal-has-a-bent_fig1_5473250
27. Retinal dehydrogenase - Wikipedia, consulté le mai 3, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Retinal_dehydrogenase
28. Perfect Molecule for Vision Shows Eyes Were Designed | The Institute for Creation Research, consulté le mai 3, 2025, <https://www.icr.org/article/perfect-molecule-for-vision-shows-eyes>
29. Crystal structure of the 13-cis isomer of bacteriorhodopsin in the dark-adapted state, consulté le mai 3, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16084526/>
30. Docking of retinal isomers to docking site II. Flexible docking of... | Download Scientific Diagram - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Docking-of-retinal-isomers-to-docking-site-II-Flexible-docking-of-a-c-11-cis-retinal_fig6_23980943
31. Binding selectivity of retinal isomers in wild-type and W167F, L212F - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Binding-selectivity-of-retinal-isomers-in-wild-type-and-W167F-L212F-and-T188C-mutant_fig1_357925376
32. A schematic representation of the visual cycle and the target of CU239.... - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-representation-of-the-visual-cycle-and-the-target-of-CU239-All-trans-ROL_fig1_324681197
33. Molecule Building, consulté le mai 3, 2025, https://www2.nau.edu/lrm22/lessons/molecule_building/molecule_building.html
34. 5. Chemistry: Representations of Molecular Structure - LabXchange, consulté le mai 3, 2025, <https://www.labxchange.org/library/pathway/lx-pathway:c8b529f2-c589-487b-876f-6d35e0076eb3/items/lb:LabXchange:e4ece957:html:1/56790>
35. ChemDoodle 3D | Molecular Modeling and Graphics Software, consulté le mai 3, 2025, <https://www.chemdoodle.com/3d>
36. ChemDoodle | Chemical Drawing Software, consulté le mai 3, 2025, <https://www.chemdoodle.com/>
37. OpenEye Scientific: Molecular Modeling Software, consulté le mai 3, 2025, <https://www.eyesopen.com/>
38. Avogadro - Free cross-platform molecular editor - Avogadro, consulté le mai 3, 2025, <https://avogadro.cc/>
39. Schrödinger - Physics-based Software Platform for Molecular Discovery & Design, consulté le mai 3, 2025, <https://www.schrodinger.com/>
40. Comparative modeling of retinol-binding protein-3 and retinal S-antigen in Eales' disease and prediction of their binding sites using computational methods, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3372607/>
41. Homology Modeling Professional for HyperChem: Tutorial 4 - Institute of Molecular Function, consulté le mai 3, 2025, <https://www.molfunction.com/tutorial4.htm>
42. UAlbany Scientists Explore New Molecular Tool to Treat Retinal Degenerative Disease, consulté le mai 3, 2025, <https://www.albany.edu/news-center/news/2023-ualbany-scientists-explore-new-molecular-tool-treat-retinal-degenerative>
43. Retinal Models: Comparison of Electronic Absorption Spectra in the Gas Phase and in Methanol Solution | The Journal of Physical Chemistry B - ACS Publications, consulté le mai 3, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp800244h>
44. Retinene - Wikipedia, consulté le mai 3, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Retinene>
45. Molecular Model Kits, Sets, Parts=Indigo Molecular Modelling Solutions - Indigo Instruments, consulté le mai 3, 2025, https://www.indigoinstruments.com/molecular_models/
46. novel recurrent ARL3 variant c.209G > A p.(Gly70Glu) causes variable non-syndromic dominant retinal dystrophy with defective lipidated protein transport in human retinal stem cell models - Oxford Academic, consulté le mai 3, 2025, <https://academic.oup.com/hmg/advance-article/doi/10.1093/hmg/ddaf029/8048703>
47. Editorial: Molecular imaging in retinal diseases - Frontiers, consulté le mai 3, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/medicine/articles/10.3389/fmed.2023.1180330/full>
48. Cells Special Issue: "The Molecular and Cellular Basis of Retinal Diseases" - PMC, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10416830/>
49. In vitro Model Systems for Studies Into Retinal Neuroprotection - Frontiers, consulté le mai 3, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2022.938089/full>

50. Molecular Mechanisms of Retinal Degeneration and How to Avoid It - MDPI, consulté le mai 3, 2025, <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/10/8752>
51. Rhodopsin-positive cell production by intravitreal injection of small molecule compounds in mouse models of retinal degeneration | PLOS One, consulté le mai 3, 2025, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0282174>
52. Preclinical Retinal Disease Models: Applications in Drug Development and Translational Research - MDPI, consulté le mai 3, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8247/18/3/293>
53. Models of retinal diseases and their applicability in drug discovery - PMC - PubMed Central, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6192033/>
54. Retinal Prostheses: Engineering and Clinical Perspectives for Vision Restoration - MDPI, consulté le mai 3, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/5782>
55. Interactive Cell: Photoreceptor Retinal Rod - 3D model by mmc farla73 - Sketchfab, consulté le mai 3, 2025, <https://sketchfab.com/3d-models/interactive-cell-photoreceptor-retinal-rod-87cf458308cd4f459644c8dc9009ba1f>
56. Retinal layers detail microscopic and schematic - 3D model by Deepankar.Parmar (@Deepankar.Parmar) [5f9d705] - Sketchfab, consulté le mai 3, 2025, <https://sketchfab.com/3d-models/retinal-layers-detail-microscopic-and-schematic-5f9d70509b404fae940aff265fce0ed0>
57. Retina-derived vasculature models - NIH 3D, consulté le mai 3, 2025, <https://3d.nih.gov/entries/3DPX-005107>
58. "retinal" 3D Models to Print - Yeggi, consulté le mai 3, 2025, <https://www.yeggi.com/q/retinal/>
59. Retinal 3D | Innovation Platform - NC3Rs, consulté le mai 3, 2025, <https://nc3rs.org.uk/crackit/retinal-3d>
60. A Comparative Analysis of Models for AAV-Mediated Gene Therapy for Inherited Retinal Diseases - MDPI, consulté le mai 3, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4409/13/20/1706>
61. Comparative Analysis of Retinal Organotypic Cultures and In Vivo Axotomized Retinas - PMC - PubMed Central, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9962025/>
62. Assessment of photoreceptor functional activity in retinal organoids using calcium imaging, consulté le mai 3, 2025, <https://www.moleculardevices.com/en/assets/app-note/dd/img/photoreceptor-functional-activity-retinal-organoids-using-calcium-imaging>
63. Retinal Organoids: Innovative Tools for Understanding Retinal Degeneration - PMC, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11990004/>
64. Retina Models | Newcells Biotech, consulté le mai 3, 2025, <https://newcellsbiotech.co.uk/models/retina-models/>
65. A look into retinal organoids: methods, analytical techniques, and applications - PMC, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8558279/>
66. Mouse models for studies of retinal degeneration and diseases. - Semantic Scholar, consulté le mai 3, 2025, <https://www.semanticscholar.org/paper/Mouse-models-for-studies-of-retinal-degeneration-Chang/76e0aeb44b26ee719aea94b05af75b0b262d7655>
67. Mathematical Models of Ocular Drug Delivery - IOVS - ARVO Journals, consulté le mai 3, 2025, <https://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2800804>
68. Comparative In Vivo Imaging of Retinal Structures in Tree Shrews, Humans, and Mice, consulté le mai 3, 2025, <https://www.eneuro.org/content/11/3/ENEURO.0373-23.2024>
69. Comparative Analysis of Molecular Landscape in Mouse Models and Patients Reveals Conserved Inflammation Pathways in Age-Related Macular Degeneration - PubMed Central, consulté le mai 3, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10774692/>
70. Comparative retinal imaging in mouse models of proteinopathies identifies disease-specific biomarkers | IOVS, consulté le mai 3, 2025, <https://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2772877>
71. A Comparison of Some Organizational Characteristics of the Mouse Central Retina and the Human Macula | PLOS One, consulté le mai 3, 2025, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0125631>
72. Advantages and limitations of different animal models of retinal ischemia. - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-limitations-of-different-animal-models-of-retinal-ischemia_tbl1_224972776
73. PRANAS: A New Platform for Retinal Analysis and Simulation - Frontiers, consulté le mai 3, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroinformatics/articles/10.3389/fninf.2017.00049/full>
74. (PDF) Simulation of the Retina: a Tool for Visual prostheses. - ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/publication/220201841_Simulation_of_the_Retina_a_Tool_for_Visual_prostheses
75. engineering functional in vitro models of the human retina using organ-on-chip technology, consulté le mai 3, 2025, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/lc/d4lc00823e>
76. Retinal Imaging Modalities: Advantages and Limitations for Clinical Practice, consulté le mai 3, 2025, <https://retinalphysician.com/issues/2011/april/retinal-imaging-modalities-advantages-and-limitations-for-clinical-practice/>
77. Looking for In Vitro Models for Retinal Diseases - MDPI, consulté le mai 3, 2025, <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/19/10334>
78. Retinal Prostheses by Ethan D. Cohen - Webvision, consulté le mai 3, 2025, <https://webvision.med.utah.edu/book/part-xv-prosthetics/retinal-prostheses-by-ethan-d-cohen/>

79. Summary table of advantages and disadvantages of the various routes of drug delivery to the retina -
ResearchGate, consulté le mai 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Summary-table-of-advantages-and-disadvantages-of-the-various-routes-of-drug-delivery-to_tbl1_363583326