



HAL
open science

Catalyse organique énantiosélective par des oligomères bien définis de chitosane

Dany Frem

► **To cite this version:**

Dany Frem. Catalyse organique énantiosélective par des oligomères bien définis de chitosane. Chimie organique. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. NNT : 2014PA112292 . tel-01221969

HAL Id: tel-01221969

<https://theses.hal.science/tel-01221969>

Submitted on 29 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 470 :
CHIMIE DE PARIS SUD

Laboratoire : *Laboratoire de Synthèse de Biomolécules*

THÈSE DE DOCTORAT

CHIMIE

par

Dany FREM

Catalyse organique énantiosélective par des oligomères

bien définis de chitosane

Date de soutenance : 29/10/2014

Composition du jury :

Directeur de thèse :	Dr. Dominique URBAN	Chargée de recherche CNRS (Université Paris-Sud)
Président :	Pr. Sylvain COTTAZ	Professeur (Université de Grenoble)
Rapporteurs :	Pr. Joanne XIE	Professeure (ENS Cachan)
	Pr. Jacques ROUDEN	Professeur (ENSI Caen)
Examineurs :	Pr. Jean-Marie BEAU	Professeur (Université Paris-Sud)

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord le Professeur Jean-Marie Beau pour m'avoir accueilli au sein de son équipe-Synthèse de Molécules et Macromolécules Bioactives (SM2B).

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, le Docteur Dominique URBAN, pour m'avoir encadré et soutenu pendant ces trois années de thèse. Je tiens à la remercier profondément pour sa gentillesse, disponibilité et ses utiles conseils scientifiques.

Je remercie le Professeur Jacques ROUDEN et le Professeure Joanne XIE pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. J'exprime également ma reconnaissance au Professeur Sylvain COTTAZ et au Professeur Jean-marie BEAU pour leur participation à ce jury en tant qu'examineurs.

Je remercie gracieusement le Professeur Cyrille KOUKLOVSKY et son équipe du Laboratoire de Chimie des Procédés et des Substances Naturelles (LCPSN) pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur leur réacteur de micro-ondes dont les résultats font l'objet du deuxième chapitre de cette thèse.

Un grand remerciement pour tous les membres du laboratoire : Docteur Gilles DOISNEAU, Docteur Yann BOURDREUX, Ludovic COSTA, Justine, Alexandra, Tien et Guillaume pour les longues discussions inspirantes et leur gentillesse.

Finalement, un remerciement pour ma famille qui m'a soutenu tout au long de ma thèse.

Dany FREM

Abréviations	1
CHAPITRE I : Introduction	2
I. Introduction générale	3
I.A. Aperçu historique.....	3
I.B. Les différents modes d'activation	5
I.B.1. Activation via une énamine et un iminium.....	5
I.B.2. Activation SOMO	7
I.C. La catalyse par les amines secondaires chirales.....	8
I.C.1. La réaction d'aldolisation	10
I.C.1.a. La réaction d'aldolisation intramoléculaire.....	10
I.C.1.b. La réaction d'aldolisation intermoléculaire.....	12
I.C.2. La réaction de Mannich.....	18
I.C.3. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation	22
I.C.3.a. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation d'aldéhydes	23
I.C.3.b. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation de cétones	27
I.C.4. La réaction d' α -alkylation	28
I.D. La catalyse par les amines primaires chirales	29
I.D.1. La réaction de Michael	30
I.D.1.a. La réaction de Michael par une activation de type énamine du nucléophile.....	30
I.D.1.b. La réaction de Michael par une activation de type iminium de l'accepteur	32
I.D.2. Les réactions de cycloaddition	34
I.D.2.a. La réaction de Diels-Alder	34
I.D.2.b. La réaction de cycloaddition 1,3-dipolaire.....	37
I.D.3. La réaction d'aldolisation.....	38
I.E. Les autres modes d'activation de l'organocatalyse.....	43
I.E.1. L'organocatalyse par un acide de Lewis chiral	43
I.E.1.a. Par des sels de phosphonium	43
I.E.1.b. Par des carbocations chiraux	46
I.E.2. L'organocatalyse par liaison hydrogène	47
I.E.2.a. Les catalyseurs de type thiourée	48
I.E.2.b. Les catalyseurs de type urée	49
CHAPITRE II : Réactions de glycosylation par activation micro-ondes	51
I. La biomasse	52
I.A. La chitine.....	53
I.A.1. Structure et isolement.....	53
I.A.2. Propriétés structurales	54
I.B. Le chitosane.....	54
I.B.1. Méthode d'obtention du chitosane par voie chimique	55
I.B.2. Méthode d'obtention du chitosane par voie enzymatique.....	56
II. Les chitoooligosaccharides (COS)	56
II.A. Dégradation chimique	57
II.A.1. via une réaction d'hydrolyse.....	57
II.A.2. via une réaction d'acétolyse	60
II.B. Autres méthodes de dépolymérisation.....	62
II.C. Synthèse de chitoooligosaccharides par réaction d'acétolyse	62

Sommaire

III. Etudes des réactions de glycosylation sous activation micro-ondes	64
III.A. Principe des réactions de glycosylation.....	65
III.B. Réactions de glycosylation assistée par les micro-ondes.....	67
III.B.1. L'activation micro-ondes en chimie organique.....	67
III.B.2. Réactions de glycosylation par activation micro-ondes.....	67
III.C. Etudes des réactions de glycosylation impliquant la <i>N</i> -acétylglucosamine peracétylée sous micro-ondes..	72
III.C.1. Résultats préliminaires	72
III.C.1.a. Réaction en présence d'alcools silylés.....	72
III.C.1.b. Réaction en présence d'alcools non protégés	75
III.D. Optimisation des réactions	77
III.D.1. Influence du catalyseur	77
III.D.2. Influences des autres paramètres	79
III.E. Extension à d'autres accepteurs.....	80
III.E.1. Résultats avec les alcools.....	80
III.E.2. Résultats avec les alcools dérivés de sucres	83
III.E.3. Résultats avec les dérivés soufrés.....	87
III.F. Mécanisme de la réaction de glycosylation.....	88
III.G. Etudes des réactions de glycosylation impliquant d'autres sucres aminés	91
III.G.1. Avec la <i>N</i> -acétylgalactosamine.....	91
III.G.2. Avec le chitobiose	92
III.H. Conclusion	94
CHAPITRE III : Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane	96
I. Spécificité de la glucosamine comme catalyseur chiral.....	97
II. L'organocatalyse par des dérivés de la D-glucosamine.....	97
II.A. Organocatalyseurs possédant une fonction amine primaire.....	98
II.A.1. Travaux antérieurs	98
II.A.2. Utilisation de dérivés α - <i>O</i> -méthyl-2-aminoglucopyranosides	99
II.A.2.a. Synthèse	99
II.A.2.b. Réaction d'aldolisation	100
II.A.2.c. Réaction de Michael	103
II.A.3. Utilisation d'un dérivé 2-aminoglucopyranose	103
II.A.3.a. Synthèses.....	104
II.A.3.b. Réaction d'aldolisation	106
II.A.4. Utilisation de dérivés de configuration β	107
II.A.4.a. Réaction d'aldolisation catalysée par le composé 168	107
II.A.4.b. Synthèse du β - <i>O</i> -méthyl-2-aminoglucopyranoside	108
II.A.4.c. Réaction d'aldolisation	109
II.B. Organocatalyseurs possédant une fonction amine secondaire.....	112
II.B.1. Synthèses des organocatalyseurs.....	112
II.B.2. Organocatalyse	114
II.B.2.a. Réaction d'aldolisation	114
II.B.2.b. Réaction de Michael.....	118
III. L'organocatalyse par des dérivés du chitosane	119
III.A. Travaux antérieurs.....	119
III.B. Synthèses.....	120
III.B.1. Synthèses d'organocatalyseurs solubles dans l'eau	120
III.B.1.a. Synthèse de dérivés β -thioglycosides.....	121
III.B.1.b. Synthèses de dérivés β -méthylglycosides.....	126
III.B.2. Synthèses d'organocatalyseurs solubles dans les solvants organiques	128
III.B.2.a. Synthèses de dérivés β -thioglycosides	128
III.B.2.b. Synthèses de dérivés β -méthylglycosides.....	130

Sommaire

III.C. L'organocatalyse.....	131
III.C.1. L'organocatalyse dans les solvants organiques	131
III.C.2. L'organocatalyse en milieux aqueux.....	134
<i>III.C.2.a. La réaction d'aldolisation dans l'eau en présence des catalyseurs de type thioglycoside ..</i>	<i>134</i>
<i>III.C.2.b. La réaction d'aldolisation dans l'eau en présence des catalyseurs de type méthylglycoside</i>	<i>139</i>
<i>III.C.2.c. Diverses réactions organocatalysées par 183 et 203.....</i>	<i>142</i>
III.D. Conclusion et perspectives	145
CONCLUSION GENERALE.....	147
EXPERIMENTAL SECTION.....	150
APPENDICE.....	206
BIBLIOGRAPHIE	217
RESUME/ABSTRACT	226

Abréviations

Å :	Angström	μ-ondes :	micro-ondes
ac . :	acide		
Boc :	<i>tert</i> -butoxycarbonyle		
CAN :	nitrate de cérium et d'ammonium		
Cbz :	carboxybenzyle		
DA :	Dalton		
DCE :	1,2-dichloroéthane		
DCM :	dichlorométhane		
DME :	diméthoxyéthane		
rd :	rapport diastéréoisomérique		
DFT :	Density Functional Theory		
DMAP :	<i>N,N</i> -4-diméthylaminopyridine		
DMF :	<i>N,N</i> -diméthylformamide		
DMSO :	diméthylsulfoxyde		
ee :	excès énantiomérique		
éq. :	équivalent		
ESI :	ionisation par électronébuliseur		
HPLC :	chromatographie liquide haute performance		
LUMO :	Lowest Unoccupied Molecular Orbital		
min :	minute		
MS :	spectrométrie de masse		
ndt :	non déterminé		
Phth :	phtalyl		
PI :	potentiel d'ionisation		
Pyr :	pyridine		
rdt :	rendement		
RMN :	Résonance Magnétique Nucléaire		
S_N1 :	substitution nucléophile monomoléculaire		
S_N2 :	substitution nucléophile bimoléculaire		
SOMO :	Singly Occupied Molecular Orbital		
T :	température		
t :	temps		
TBDPS :	<i>tert</i> -butyldiphénylsilyle		
t.a. :	température ambiante		
TBS :	<i>tert</i> -butyldiméthylsilyle		
TCA :	acide trichloroacétique		
TES :	triéthylsilane		
TFA :	acide trifluoroacétique		
THF :	tétrahydrofurane		
TMS :	triméthylsilyle		
Tf :	triflate		
TOCSY :	TOTAL Correlated SpectroscopY		

CHAPITRE I

Introduction

I. Introduction générale:

Le pouvoir de créer sélectivement un centre chiral dans les molécules organiques était et va rester l'ultime défi des chimistes organiciens. La nécessité de produire des composés énantiomériquement purs ou enrichis, utilisés notamment dans les industries pharmaceutiques et agrochimiques, a permis au domaine de la catalyse énantiosélective de se développer durant la deuxième moitié du XX^e siècle. A cette époque, la synthèse énantiosélective était étroitement liée à deux grands domaines de la catalyse: la catalyse à base de métaux de transition (catalyse organométallique) et la catalyse enzymatique (biocatalyse). Cependant, au début des années 2000, la situation va bientôt évoluer grâce aux travaux pionniers de *List*, *Barbas* et *Lerner*.¹ Ils ont, pour la première fois, reporté une réaction d'aldolisation asymétrique catalysée par un acide aminé naturel: la (*S*)-proline. Ces travaux ont marqué la naissance d'un troisième domaine de la catalyse énantiosélective, connue aujourd'hui sous le nom d'organocatalyse.² Le terme organocatalyse,³ proposé par *David MacMillan*, désigne la catalyse des réactions chimiques par des petites molécules organiques comportant l'élément carbone, hydrogène, oxygène, azote, soufre ou phosphore. Il faut bien noter, que certains rares exemples de catalyse induite par des molécules chirales sont apparus bien avant les travaux de *List et MacMillan* mais ces réactions n'ont pas été considérées comme organocatalysées car le terme n'existait pas à cette époque. L'organocatalyse présente de nombreux avantages par rapport à la catalyse métallique : la plupart des réactions ne sont pas sensibles à l'air et à l'humidité et sont donc par conséquent plus faciles à mettre en œuvre. Les organocatalyseurs sont des entités stables et, en général, moins chers que leurs homologues métalliques. De plus, en présence d'organocatalyseurs, aucune contamination des produits de synthèse par les métaux ne peut avoir lieu. Finalement, la possibilité d'immobiliser ces organocatalyseurs sur un support permet l'accès à des catalyseurs hétérogènes ce qui permet de les recycler et les réutiliser.

I.A. Aperçu historique:

En 1912, *Georg Breiding* a utilisé des dérivés d'alcaloïdes, la (-)-quinine ou son stéréoisomère la (+)-quinidine, comme catalyseur pour la réaction d'addition de l'acide cyanhydrique sur le benzaldéhyde **1** (Schéma 1).⁴

¹ B. List, R. A. Lerner, C. F. Barbas, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 2395-2396.

² Pour des revues sur l'organocatalyse, voir: a) H. Pellissier, *Tetrahedron* **2007**, *63*, 9267-9331; b) P. I. Dalko, L. Moisan, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 5138-5175; c) J. Seayad, B. List, *Org. Biomol. Chem.* **2005**, *3*, 719-724.

³ K. A. Ahrendt, C. J. Borths, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 4243-4244.

⁴ G. Breiding, P.S. Fiske, *Biochem. Z.* **1912**, *46*, 7.

Introduction

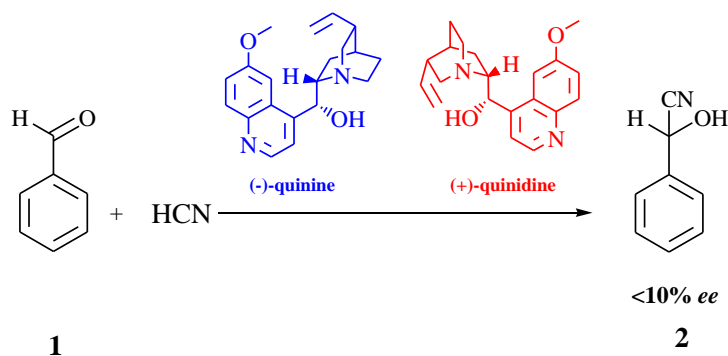


Schéma 1

Même si cette réaction conduit à un faible excès énantiomérique (<10% ee), elle constitue le premier exemple de catalyse énantiosélective induite par des petites molécules organiques chirales.

Il a fallu attendre l'année 1954, pour que *Horst Pracejus* publie l'addition du méthanol sur le méthyl phénylcétène **3** en présence de la *O*-acétylquinine comme catalyseur, conduisant à l'ester méthylique **4** avec une conversion quasi-totale (99%) et une bonne énantiosélectivité (74% ee) (Schéma 2).⁵

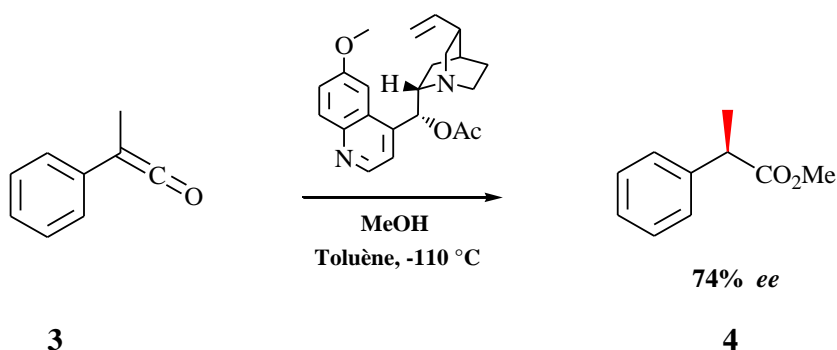


Schéma 2

Le dernier exemple significatif est celui rapporté indépendamment par *Eder, Sauer* et *Wiechert*⁶ (en 1971) et par *Hajos* et *Parrich*⁷ (en 1974). Leurs travaux concernaient l'étude de la réaction d'aldolisation intramoléculaire de la tricétone pro-chirale **5** catalysée par un acide aminé naturel, la (*S*)-proline.

⁵ H. Pracejus, *Justus Liebigs Ann. Chem.* **1960**, 634, 9-22.

⁶ U. Eder, G. Sauer, R. Wiechert, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1971**, 10, 496-497.

⁷ Z. G. Hajos, D. R. Parrish, *J. Org. Chem.* **1974**, 39, 1615-1621.

Introduction

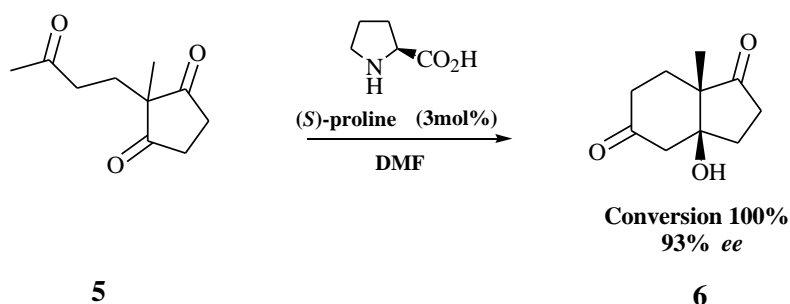


Schéma 3

Seulement 3 mol% de catalyseur sont nécessaires pour permettre une conversion totale. *Hajos* et *Parrich* ont ainsi considéré qu'il s'agissait d'un exemple simplifié d'un système biologique où la (*S*)-proline jouerait le rôle d'une enzyme. Malgré ces résultats très intéressants, le domaine de l'organocatalyse est resté "dormant" jusqu'à la veille du 21^{ème} siècle où les contributions de *List* et *MacMillan* ont permis son essor.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons principalement à l'aminocatalyse,⁸ organocatalyse induite par des dérivés possédant une ou plusieurs fonctions amine. Après la description des différents mécanismes d'activation, nous détaillerons les différentes réactions catalysées par des dérivés de type amine primaire puis amine secondaire. La dernière partie sera consacrée aux activations par des acides de Lewis chiraux et par liaisons hydrogène.

I.B. Les différents modes d'activation:

Trois grands modes d'activation sont actuellement admis : l'activation *via* une énamine ou *via* un iminium et l'activation SOMO.

I.B.1. Activations *via* une énamine et un iminium

L'activation par une énamine met en jeu un dérivé carbonyle (cétone ou aldéhyde) énolisable et une amine primaire ou secondaire conduisant à la formation d'un intermédiaire iminium. L'acidité du proton en position α devient, par conséquent, plus importante (diminution de la LUMO) permettant une réaction de déprotonation afin de conduire à l'énamine correspondante. Cette entité nucléophile peut alors réagir avec des entités électrophiles permettant ainsi de réaliser des additions ou des substitutions nucléophiles (Schéma 4). L'hydrolyse de l'iminium résultant permettra de régénérer le catalyseur en libérant le nouveau dérivé carbonyle.

⁸ Pour des revues sur l'aminocatalyse, voir: a) B. List, *Chem. Commun.* **2006**, 819-824; b) P. Melchiorre, M. Marigo, A. Carlone, G. Bartoli, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2008**, *47*, 6138-6171; c) S. Bertelsen, K. A. Jørgensen, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 2178-2189; d) M. Nielsen, D. Worgull, T. Zweifel, B. Gschwend, S. Bertelsen, K. A. Jørgensen, *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 632-649; e) M. J. Gaunt, C. C. C. Johansson, A. McNally, N. T. Vo, *Drug Discovery Today* **2007**, *12*, 8-27.

Introduction

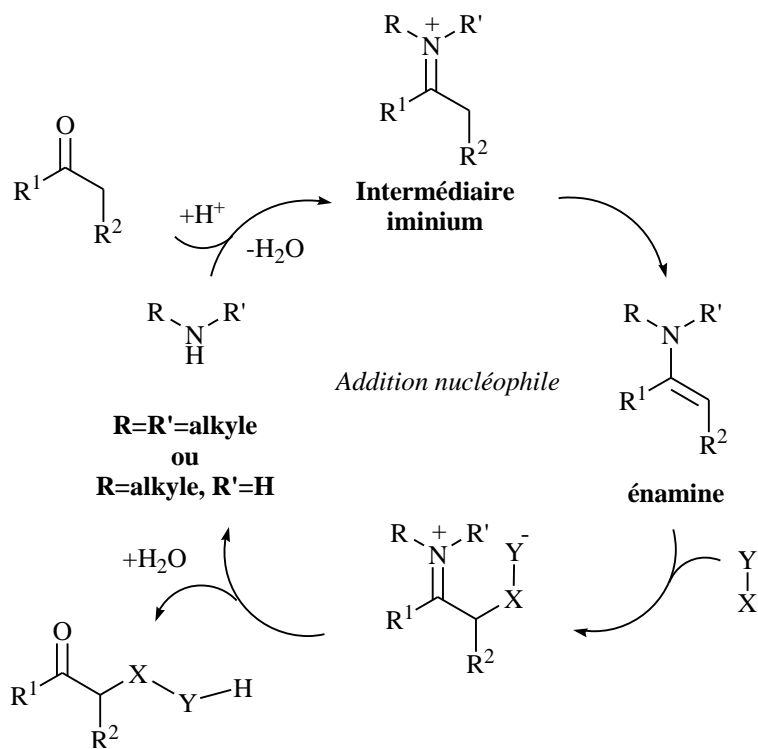
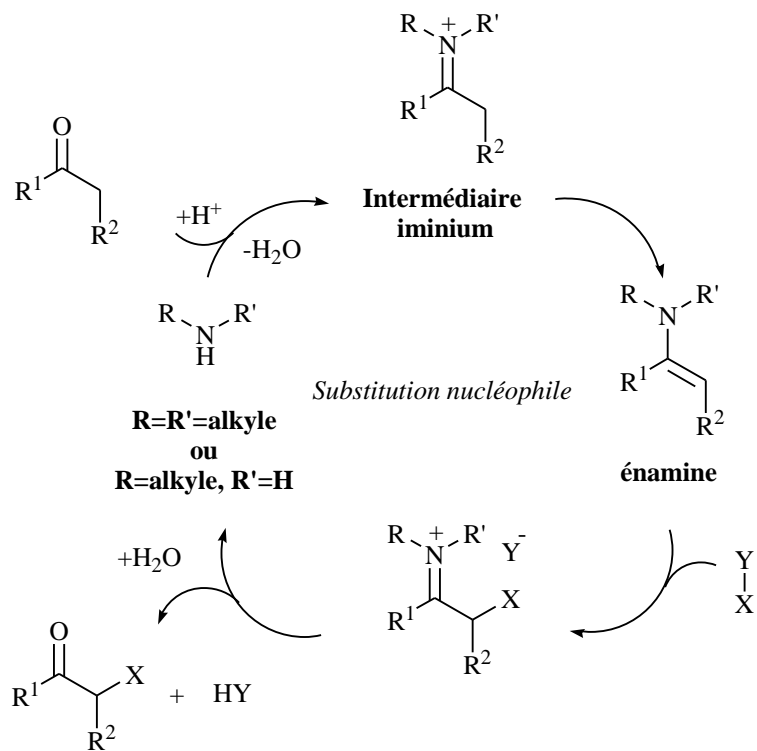
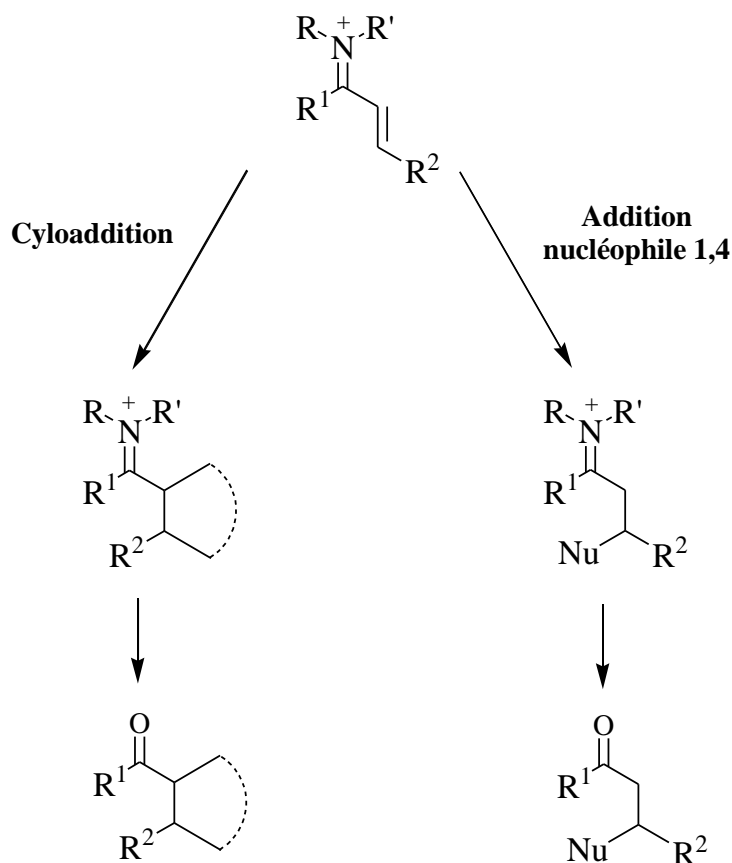


Schéma 4

Introduction

Ce mécanisme de formation d'énamine est universel pour les amines secondaires et primaires et par conséquent le terme de **catalyse énamine**⁹ a été attribué à ce type d'activation. Il intervient principalement dans les réactions d'aldolisation¹⁰ et de Mannich asymétriques.¹¹

L'activation via un iminium (**catalyse iminium**)¹² met quant à elle en jeu un aldéhyde non énolisable de type α,β -insaturé. L'iminium joue alors le rôle d'une entité électrophile pouvant être impliquée dans des réactions de cycloadditions ou dans des réactions d'addition 1,4 de type Michael asymétriques (Schéma 5).



Le premier travail utilisant ce type de catalyse était une réaction de Diels-Alder énantiosélective rapporté par le groupe de *MacMillan*.³

I.B.2. Activation SOMO

L'activation SOMO représente le troisième mode d'activation et ne concerne que les catalyseurs chiraux possédant une fonction amine secondaire. Cette activation représente une alternative très intéressante car elle permet de réaliser des réactions qui ne pouvaient pas être

⁹ a) B. List, *Acc. Chem. Res.* **2004**, *37*, 548-557; b) S. Mukherjee, J. W. Yang, S. Hoffmann, B. List, *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 5471-5569.

¹⁰ W. Notz, B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 7386-7387.

¹¹ B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 9336-9337.

¹² Pour une revue, voir: A. Erkkilä, I. Majander, P. M. Pihko, *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 5416-5470.

Introduction

catalysées par les deux modes d'activation précédents comme les réactions d' α -allylation de dérivés carbonylés.

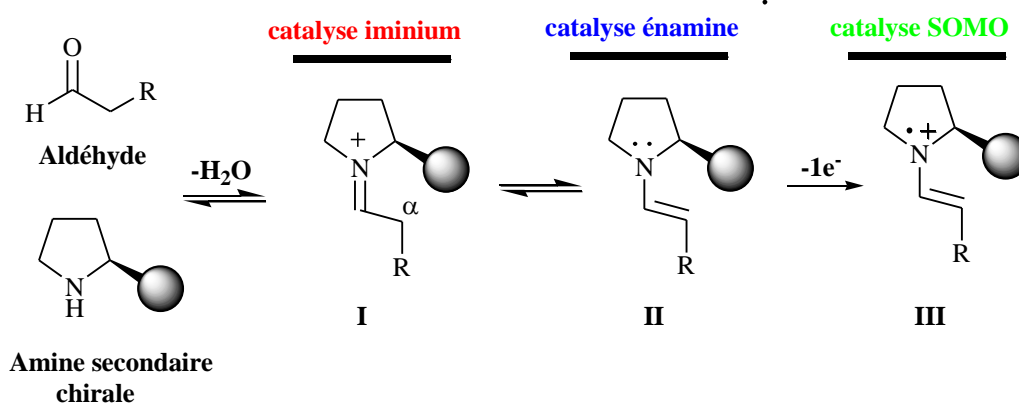


Schéma 6

Les travaux de l'équipe de *MacMillan* sur l' α -fonctionnalisation énantiosélective des aldéhydes,¹³ réalisés en 2007, ont montré que l'espèce **III** pouvait être formée en oxydant sélectivement l'espèce **II**, issue de l'interconversion de l'iminium **I** en énamine (Schéma 6). Le radical cation **III** ainsi formé possède 3 électrons π dont une orbitale moléculaire contenant un seul électron d'où le nom SOMO (Singly Occupied Molecular Orbital). Cette espèce peut ensuite réagir avec des espèces "radicalophiles ou SOMOphiles" tels que les allylsilanes permettant de fonctionnaliser en α le dérivé carbonylé.

Des exemples de réactions utilisant les différents modes d'activation cités ci-dessus vont être détaillés ci-dessous. Nous avons choisi de les classer selon la substitution de la fonction amine.

I.C. La catalyse par les amines secondaires chirales

Comme nous l'avons dit précédemment, l'organocatalyse a connu un essor considérable avec l'utilisation de la (*S*)-proline. Cela est principalement dû à plusieurs propriétés intéressantes¹⁴:

- sa grande abondance naturelle
- son faible coût
- sa faible toxicité
- la disponibilité des deux formes énantiomériques

Cet acide aminé cyclique s'est révélé très performant comme catalyseur dans les transformations énantiosélectives. De part sa nature, il possède une fonction amine secondaire ayant un pK_a élevé comparé aux autres acides aminés ce qui renforce la nucléophilie de l'azote et une fonction acide

¹³ T. D. Beeson, A. Mastracchio, J.-B. Hong, K. Ashton, D. W. C. MacMillan, *Science* **2007**, *316*, 582-585.

¹⁴ B. List, *Tetrahedron* **2002**, *58*, 5573-5590.

Introduction

carboxylique qui joue le rôle d'un acide de Brønsted ou même de donneur de liaison hydrogène. Il est ainsi qualifié de catalyseur bifonctionnel, capable d'adopter des états de transition bien organisés de type Zimmerman-Traxler conduisant souvent à des réactions hautement énantiosélectives. Le schéma 7 représente l'état de transition proposé par List et Houk¹⁵ qui met en évidence la coopération de la fonction amine et acide carboxylique dans la réaction d'aldolisation de Hajos-Parrich-Eder-Sauer-Wiechert présentée dans le schéma 3.

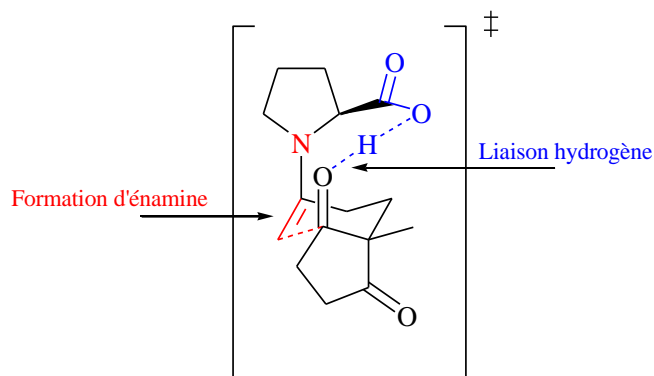


Schéma 7

Plusieurs dérivés de la proline ont été également synthétisés comme les dérivés de pyrrolidine sulfonamide (**I**)¹⁶, les éthers silylés du prolinol (**II**)¹⁷ et les prolines greffées sur des supports polymériques de type polystyrène (**III**)¹⁸ (Schéma 8).

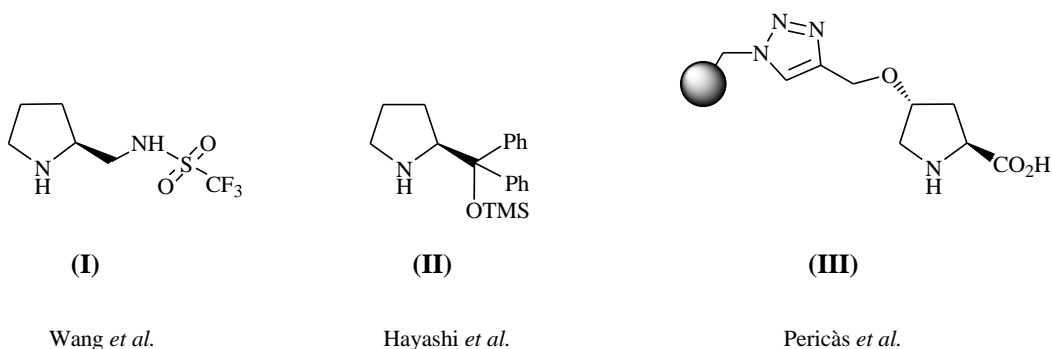


Schéma 8

Les catalyseurs de type (**I**) et (**II**) ont été développés comme substitués de la proline notamment pour effectuer des réactions d'addition sur les nitrooléfines que la proline ne peut pas catalyser.

¹⁵ L. Hoang, S. Bahmanyar, K. N. Houk, B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *125*, 16-17.

¹⁶ W. Wang, H. Li, J. Wang, *Tetrahedron Lett.* **2005**, *46*, 5077-5079.

¹⁷ a) Y. Hayashi, H. Gotoh, T. Hayashi, M. Shoji, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 4212-4215; b) K. L. Jensen, G. Dickmeiss, H. Jiang, L. Albrecht, K. A. Jørgensen, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 248-264.

¹⁸ D. Font, C. Jimeno, M. A. Pericàs, *Org. Lett.* **2006**, *8*, 4653-4655.

Introduction

L'organocatalyseur (**III**) est greffé sur un support ce qui facilite l'étape de purification. Il peut être récupéré par une simple filtration et réutilisé de nouveau.

I.C.1. La réaction d'aldolisation

La réaction d'aldolisation énantiosélective constitue un outil puissant pour la formation de liaisons carbone-carbone en chimie et en biologie¹⁹ permettant ainsi la production des intermédiaires chiraux essentiels pour la synthèse d'une grande variété de produits naturels complexes.²⁰ Par exemple la synthèse de la (*S*)-Ipsenol **9**, ingrédient principal d'une phéromone du coléoptère *Ips paraconfusus*²¹, débute par une réaction d'aldolisation intermoléculaire entre l'isovaléraldéhyde **7** et l'acétone en présence de 10-20 mol% de (*S*)-proline, conduisant au produit d'aldolisation **8** avec une bonne énantiosélectivité (73% ee).²²

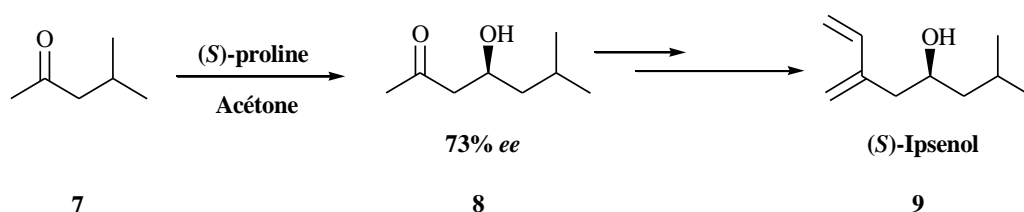


Schéma 9

I.C.1.a. La réaction d'aldolisation intramoléculaire

La réaction d'aldolisation intramoléculaire permet d'obtenir des cycles à 5, 6 ou 7 chaînons. Elle existe sous la forme de deux versions : une version *énolendo* et une version *énolexo* (Schéma 10).⁹

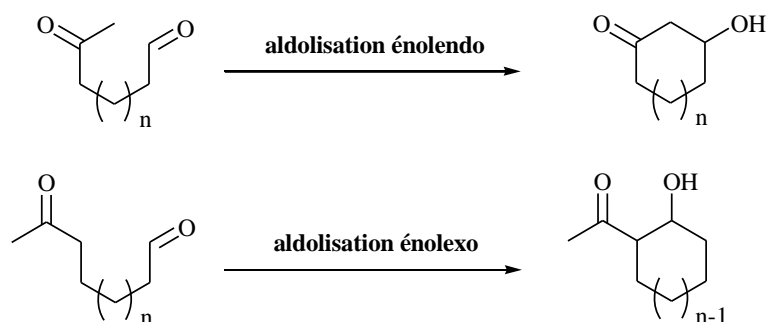


Schéma 10

¹⁹ G. Lelais, D. W. C. MacMillan, "History and perspective of chiral organic catalysts" in *New frontiers in asymmetric catalysis*, K. Mikami, M. Lautens, Eds., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, **2007**.

²⁰ M. Waser, "Asymmetric Organocatalysis in Natural Product Syntheses" -Progress in the Chemistry of Organic Natural Products, Vol. 96, A.D. Kinghorn, H. Falk, J. Kobayashi, Eds., Springer-Verlag, Wien, **2012**.

²¹ K. Draillard, J. Lebreton, J. Villieras, *Tetrahedron: Asymmetry* **1999**, *10*, 4281-4284.

²² B. List, P. Pojarliev, C. Castello, *Org. Lett.* **2001**, *3*, 573-575.

Introduction

Depuis la réaction de Hajos-Parrish-Eder-Sauer-Wiechert et jusqu'en 2003, seules les réactions d'aldolisation intramoléculaire de type *6-énolendo* ont été reportées. Un exemple de ce type de cyclisation, rapporté par Agami et coll.²³, est représenté ci-dessous :

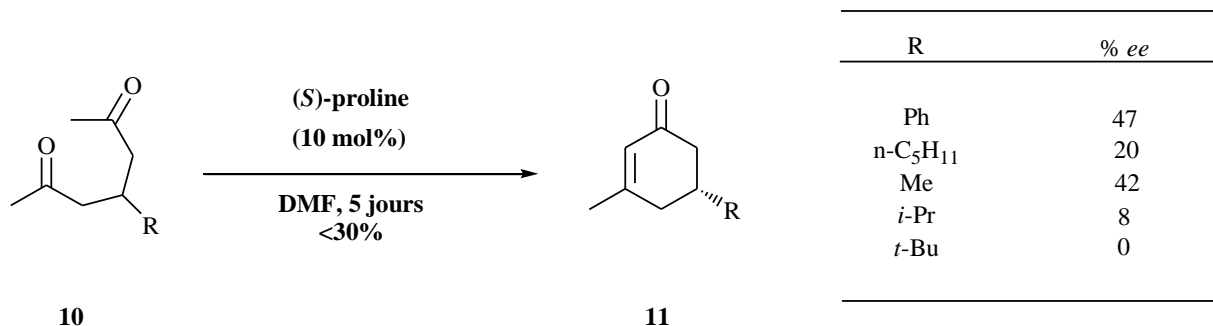


Schéma 11

En présence de (*S*)-proline, la 2,6-heptadione **10** est convertie en ènone **11** énantiomériquement enrichie, résultant d'une réaction de déshydratation de l'adduit d'aldolisation. Les rendements et énantiosélectivités sont cependant modestes.

En 2003, la première cyclisation intramoléculaire de type *6-énolexo* a été publiée par List et coll.²⁴ En présence de (*S*)-proline, l'heptane-1,5-dialdéhyde **12** est converti en 2-hydroxycyclohexancarboxaldéhyde **13** avec un très bon rendement de 95%. Cette réaction s'est révélée hautement énantiosélective et diastéréosélective avec une préférence pour l'adduit *anti*. En 2005, l'équipe d'Afonso²⁵ a utilisé la 4-hydroxyproline pour catalyser la réaction d'aldolisation de type *énolexo* du dérivé *méso* **14**, conduisant ainsi à l'aldéhyde **15** avec une bonne énantiosélectivité (Schéma 12).

²³ a) C. Agami, H. Sevestre, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1984**, 1385-1386; b) C. Agami, N. Platzer, H. Sevestre, *Bull. Soc. Chim. Fr.* **1987**, 2, 358-360.

²⁴ C. Pidathala, L. Hoang, N. Vignola, B. List, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2003**, 42, 2785-2788.

²⁵ V. B. Kurteva, C. A. M. Afonso, *Tetrahedron* **2005**, 61, 267-273.

Introduction

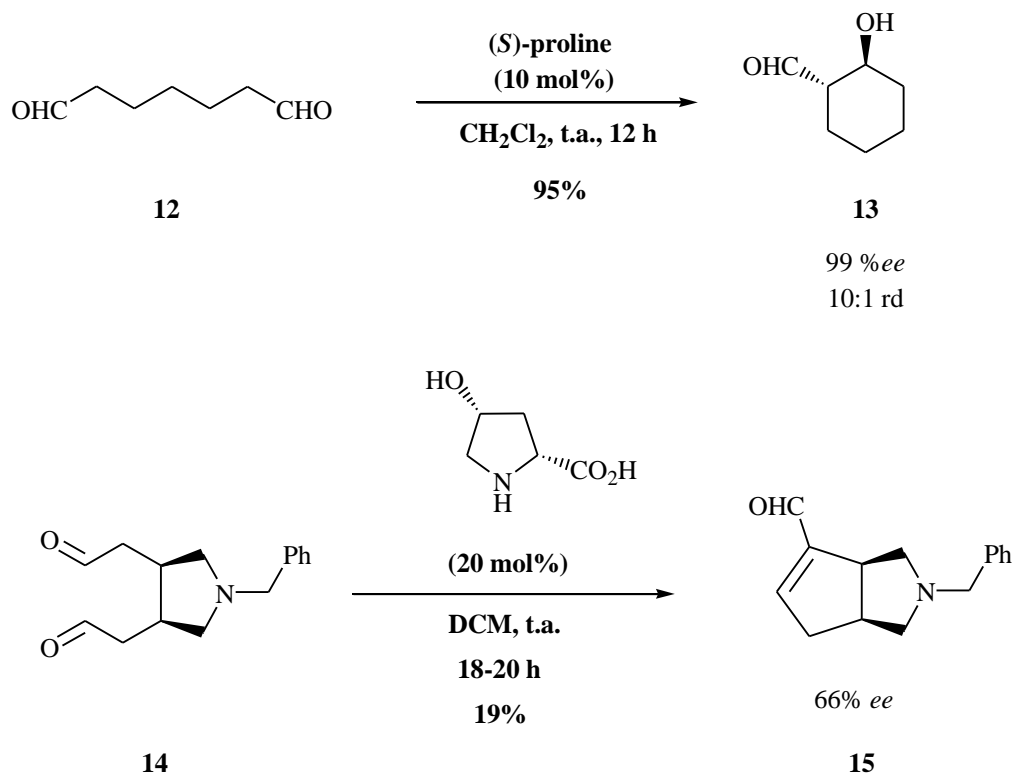
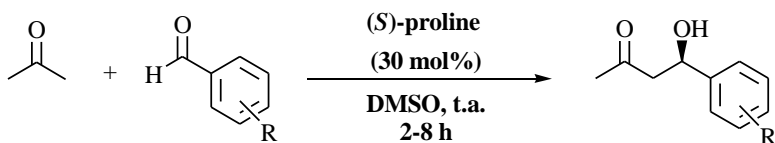


Schéma 12

I.C.1.b. La réaction d'aldolisation intermoléculaire

La première version d'aldolisation intermoléculaire catalysée par la (*S*)-proline a été décrite par List et coll.^{1,26} où l'acétone réagit avec plusieurs aldéhydes aromatiques.



R	rendement %	% <i>ee</i>
H	62	60
4-NO ₂	68	76
4-Br	74	65
4-Cl	94	69

Schéma 13

Le mécanisme de la réaction de formation des adduits a été expliqué en se basant sur le mode d'activation par énamine. L'énamine formée entre l'acétone et la (*S*)-proline peut ensuite réagir avec l'aldéhyde *via* un état de transition de type Zimmerman-Traxler chélaté (**I**) ce qui explique les bons excès énantiomériques des adduits (Schéma 14).

²⁶ B. List, *Synlett* **2001**, 1675-1686.

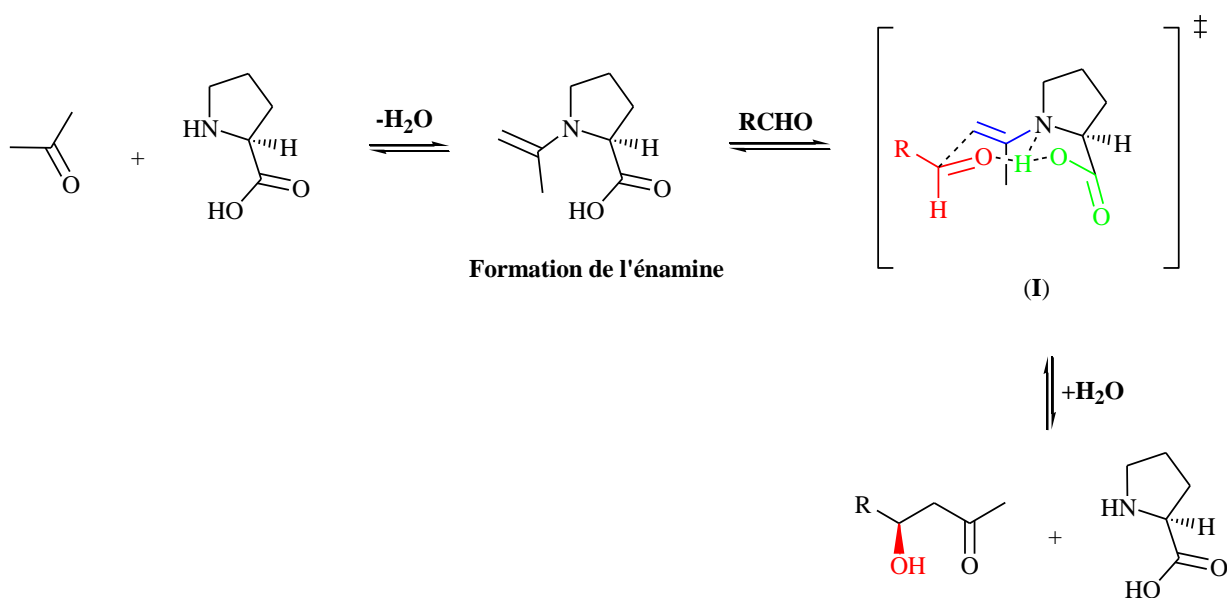


Schéma 14

Cependant ces derniers peuvent être nettement améliorés lorsque la même réaction est catalysée par le bis-prolinamide **16**²⁷, possédant un axe de symétrie C₂ (Schéma 15).

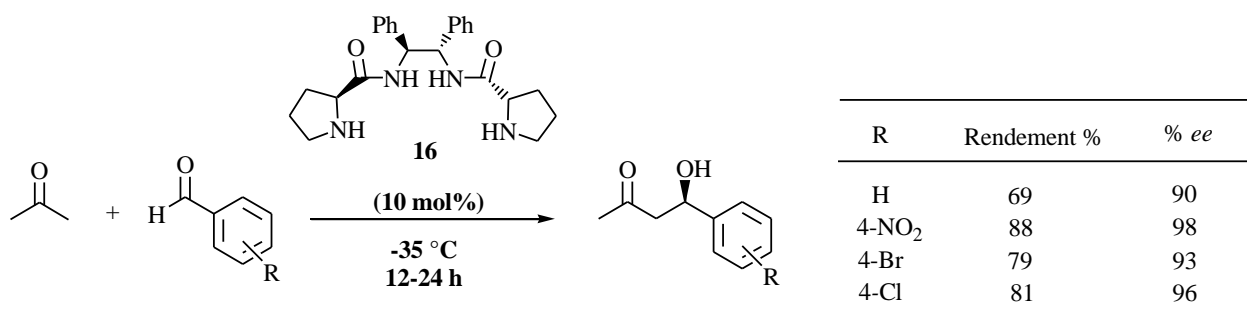


Schéma 15

Le remplacement du groupement amide par un thioamide permet d'obtenir des organocatalyseurs exceptionnellement puissants pour la réaction d'aldolisation asymétrique. En utilisant l'eau comme solvant, Li et coll.²⁸ ont démontré que le thioprolinamide **17** était capable de catalyser la réaction d'aldolisation de l'acétone avec différents aldéhydes en présence d'une très faible quantité de catalyseur (0.1-0.2 mol%). Cependant l'ajout de 2 mol% d'acide benzoïque comme co-catalyseur permet d'améliorer les rendements et les excès énantiomériques.

²⁷ S. Samanta, J. Liu, R. Dodda, C.-G. Zhao, *Org. Lett.* **2005**, 7, 5321-5323.

²⁸ B. Wang, X.-w. Liu, L.-y. Liu, W.-x. Chang, J. Li, *Eur. J. Org. Chem.* **2010**, 5951-5954.

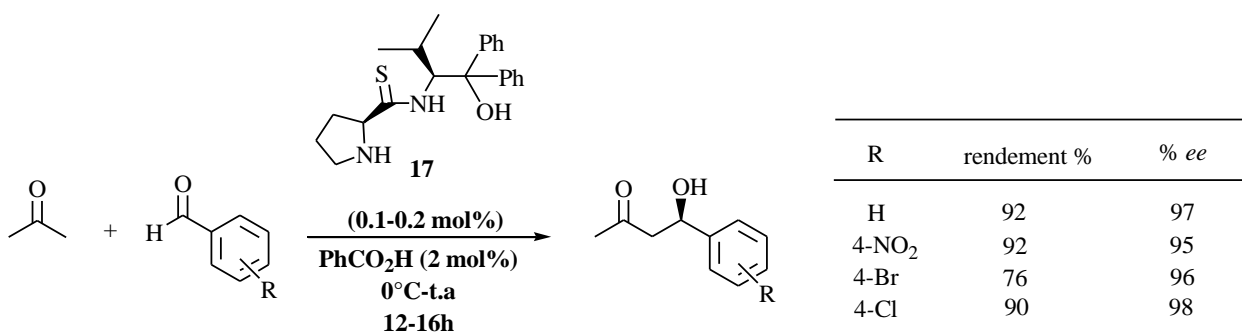


Schéma 16

L'explication donnée par les auteurs concernant la meilleure réactivité de ces organocatalyseurs bifonctionnels de type thioprolinamide comparé à leurs analogues oxygénés, repose sur le fait que le proton du groupement thioamide est plus acide que celui du groupement amide. Ce postulat a été confirmé par une étude théorique²⁹ sur les pK_a de différents dérivés de thioprolinamide et de prolinamide dans le DMSO (Tableau 1).

Composé	pK _a théorique dans le DMSO							
	R=	H	Me	Et	<i>i</i> -Pr	<i>t</i> -Bu	CF ₃	Ph
		25.6	27.6	28.6	29.4	30.1	13.6	23.5
		19.0	20.6	20.4	21.3	22.5	9.6	16.7

Tableau 1

Par conséquent, la présence d'un proton plus acide (pK_a faible) permet de générer une liaison hydrogène plus forte augmentant ainsi l'électrophilie du groupement carbonyle de l'aldéhyde, ce qui a un fort impact sur la réactivité et l'énantiosélectivité.³⁰

Jusqu'à présent, les réactions d'aldolisation présentées ci-dessus conduisaient à la formation d'un seul centre asymétrique. En revanche, en présence de cétones autre que l'acétone, la réaction d'aldolisation permet de créer 2 centres stéréogènes contigus. Dans ce cas, deux diastéréoisomères, *syn* et *anti*, peuvent être isolés (Schéma 17).

²⁹ X.-Y. Huang, H.-J. Wang, J. Shi, *J. Phys. Chem. A* **2009**, *114*, 1068-1081.

³⁰ D. Gryko, M. Chromiński, D. J. Pielacińska, Prolinethioamides versus Prolinamides in Organocatalyzed Aldol Reactions—A Comparative Study. *Symmetry* **2011**, *3*, 265-282.

Introduction

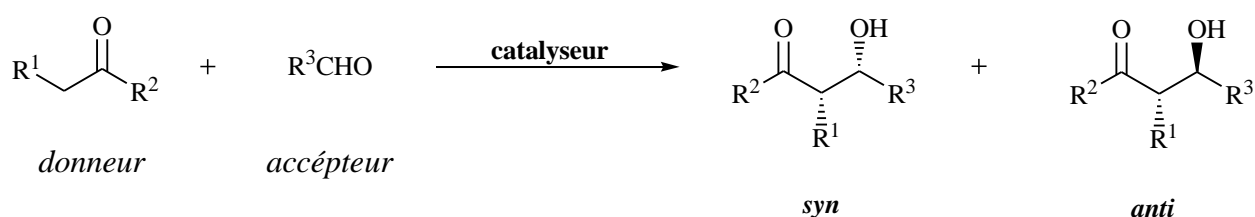


Schéma 17

Les composés carbonylés donneurs (espèces qui forment l'énamine) sont typiquement des cétones alors que les accepteurs (entités électrophiles) sont généralement des aldéhydes.

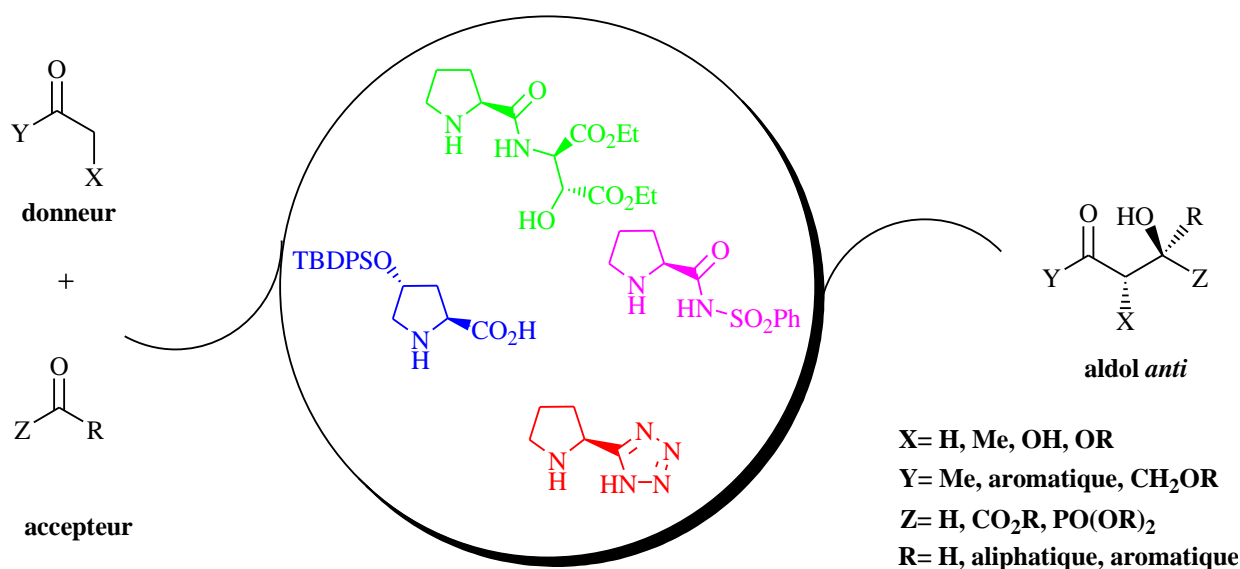


Schéma 18

Une grande diversité d'accepteurs, aldéhydes aromatiques substitués pauvres ou riches en électrons, et de donneurs, cétones cycliques ou acycliques, a été utilisée lors des réactions d'aldolisation catalysées par la proline ou ses dérivés.³¹ Généralement, cette réaction s'avère être très régio-, énantio- et diastéréosélective avec la formation prédominante des diols 1,2 *anti*. Cette diastéréosélectivité est surtout élevée lorsque des cétones cycliques (e.g. cyclohexanone, tétrahydro-4H-thiopyran-4-one) sont impliquées dans la réaction. Elle peut être inversée dans le cas où les organocatalyseurs possèdent une fonction amine primaire ; les adduits *syn* sont isolés

³¹ P. M. Pihko, I. Majander, A. Erkkilä, "Enamine Catalysis" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.

Introduction

avec des bonnes énantiosélectivités (>99% *ee*) et diastérosélectivités (*syn:anti* allant jusqu'à 12:1).³²

Le dérivé *trans*-4-silyloxy proline **18** développé par Hayashi et *al.*³³ constitue un exemple intéressant d'organocatalyseur pour la réaction d'aldolisation intermoléculaire dans l'eau.

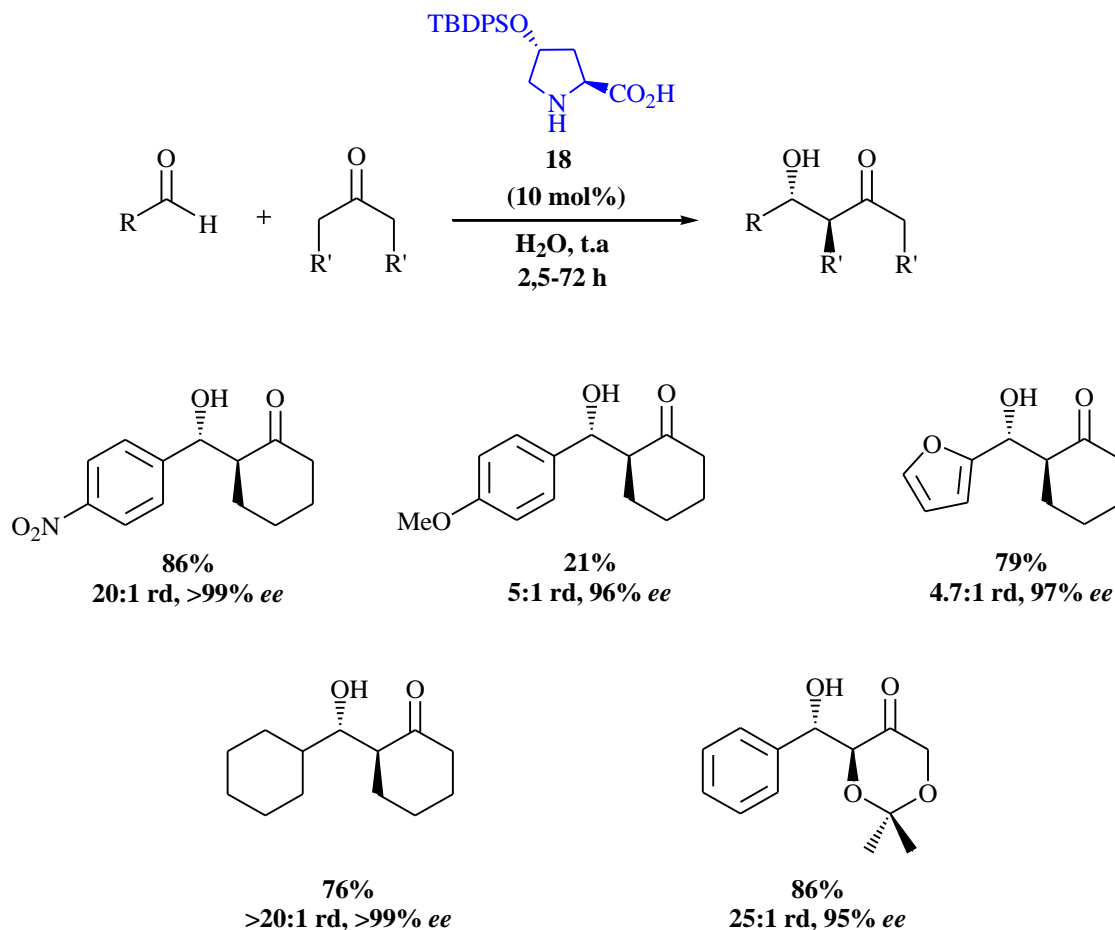


Schéma 19

Il est important de mentionner que les réactions d'aldolisation intermoléculaire mettant en jeu une cétone comme accepteur sont rares. Ces réactions sont toutefois possibles avec des cétones très réactives comme le cétophosphonate **19**³⁴ et le phénylglyoxylate **20**.³⁵

³² a) S. Luo, H. Xu, J. Li, L. Zhang, J.-P. Cheng, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 3074-3075; b) S. S. V. Ramasastry, K. Albertshofer, N. Utsumi, C. F. Barbas, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 1621-1624.

³³ Y. Hayashi, T. Sumiya, J. Takahashi, H. Gotoh, T. Urushima, M. Shoji, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 958-961.

³⁴ S. Samanta, C.-G. Zhao, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 7442-7443.

³⁵ O. Tokuda, T. Kano, W.-G. Gao, T. Ikemoto, K. Maruoka, *Org. Lett.* **2005**, *7*, 5103-5105.

Introduction

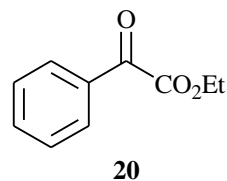
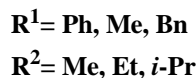
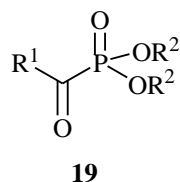


Schéma 20

Le phénylglyoxylate **20** réagit avec la cyclohexanone en présence de 50 mol% de (*S*)-proline pour fournir l' α -hydroxyester **21**, qui après transformation donne l' α -hydroxyacide **22**, intermédiaire important pour la synthèse de la (*S*)-oxybutynine **23**, médicament utilisé pour le traitement de l'incontinence urinaire.³⁶

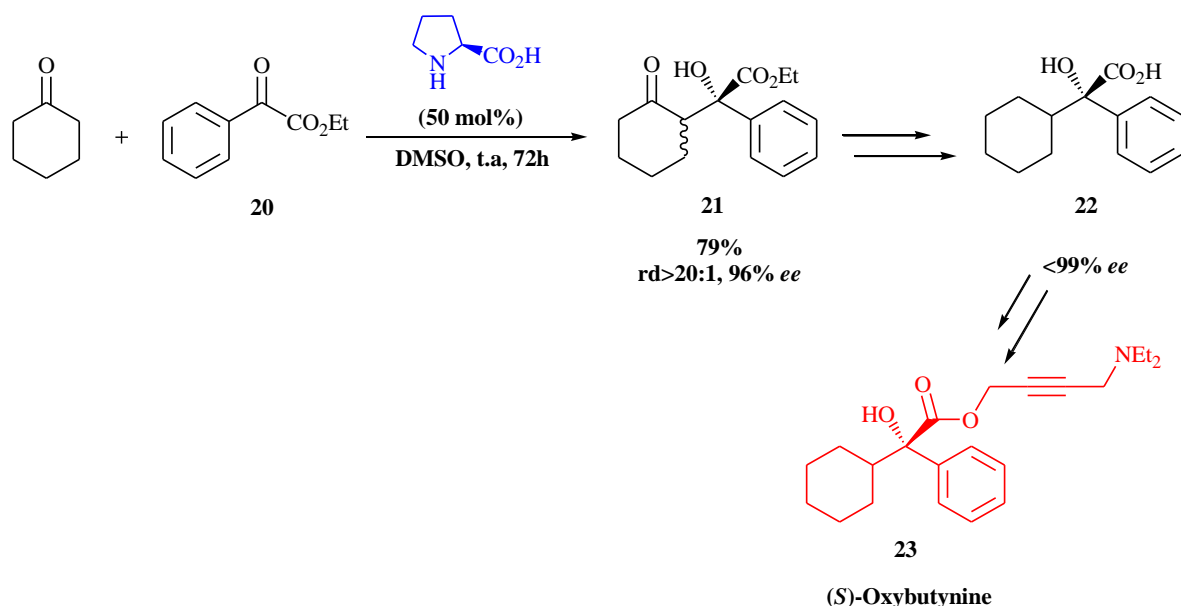


Schéma 21

L'utilisation d'aldéhydes en tant que donneurs n'est pas très répandue. En effet, outre la plus faible réactivité des énamines issues des aldéhydes comparées à celles dérivées des cétones, l'utilisation des deux aldéhydes requiert une différenciation de ces derniers en tant que donneur nucléophile et accepteur électrophile. En 2002, MacMillan a contourné le problème en utilisant 2 équivalents de propionaldéhyde en présence de (*S*)-proline. La réaction d'auto-aldolisation conduit aux β -hydroxyaldéhydes *anti* avec une excellente énantiosélectivité.³⁷ Ce groupe a également démontré qu'une certaine flexibilité au niveau de la structure des aldéhydes donneurs pouvait être tolérée. C'est le premier exemple d'aldolisation intermoléculaire croisée entre deux aldéhydes.

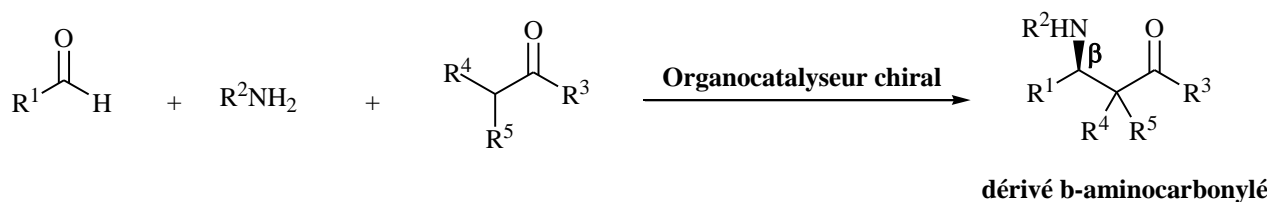
³⁶ C. H. Senanayake, K. Fang, P. Grover, R. P. Bakale, C. P. Vandenbossche, S. A. Wald, *Tetrahedron Lett.* **1999**, *40*, 819-822.

³⁷ A. B. Northrup, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 6798-6799.

I.C.2. La réaction de Mannich

La réaction de Mannich est souvent utilisée pour la formation des molécules contenant une fonction azotée. De nombreuses études sur le développement de cette réaction dans sa version asymétrique ont été menées.^{38,39} Cette réaction met en jeu un aldéhyde, une cétone et une amine qui réagissent d'une manière directe pour former un composé β -aminocarbonylé. La méthode indirecte repose sur la pré-formation de l'imine (formée par la réaction entre l'aldéhyde et l'amine) qui ensuite réagira avec une cétone (Schéma 22).

Méthode directe (synthèse monotopie à 3 composants):



Méthode indirecte:

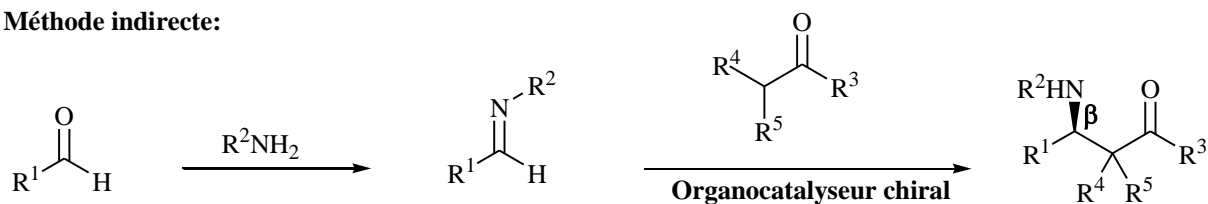


Schéma 22

La première réaction de Mannich directe organocatalysée a été reportée par List *et al.*¹¹ Dans cette réaction, l'acétone, la *p*-anisidine et différents aldéhydes réagissent en présence de la (*S*)-proline pour fournir les bases de Mannich correspondantes (Schéma 23).

³⁸ X.-H. Cai, H. Guo, B. Xie, *Eur. J. Chem.* **2012**, 3, 258-266.

³⁹ A. Berkessel, H. Groger, D. MacMillan "Asymmetric Organocatalysis: From Biomimetic Concepts to Applications in Asymmetric Synthesis", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, **2005**.

Introduction

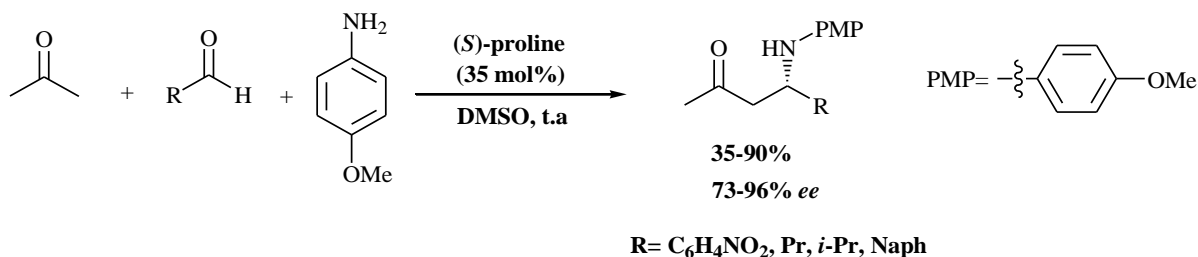


Schéma 23

Les réactions de Mannich conduisent généralement aux adduits de configuration *syn* avec une diastéréo- et énantiosélectivité élevées en présence de la proline ou de ses dérivés.⁴⁰ La diastéréosélectivité *syn* obtenue est inverse à celle observée avec ces mêmes catalyseurs lors des réactions d'aldolisation. Hayashi *et al.*⁴¹ ont démontré que le dérivé *trans*-4-silyloxy proline **18** était un catalyseur plus performant que la proline pour la réaction de Mannich avec des aldéhydes riches en électrons (e.g. *p*-anisaldéhyde, vératraldéhyde, etc...). Alors que la proline se révèle pratiquement inactive, seulement 5 mol% de **18** (dans le DMSO et à -20 °C) sont nécessaires pour obtenir des rendements entre 48 et 63% avec des excellentes énantiosélectivités (93-98% *ee*).

La synthèse des 1,2-azidoamines a été effectuée *via* une réaction de Mannich en employant le dérivé (*S*)-(-)-5-(2-pyrrolidiny)-1H-tétrazole **24**. Cette réaction conduit à la formation de deux centres asymétriques avec une stéréosélectivité relative *syn* (Schéma 24).⁴²

⁴⁰ A. Córdova, S.-i. Watanabe, F. Tanaka, W. Notz, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 1866-1867.

⁴¹ Y. Hayashi, J. Yamaguchi, K. Hibino, T. Sumiya, T. Urushima, M. Shoji, D. Hashizume, H. Koshino, *Adv. Synth. Catal.* **2004**, *346*, 1435-1439.

⁴² N. S. Chowdari, M. Ahmad, K. Albertshofer, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *Org. Lett.* **2006**, *8*, 2839-2842.

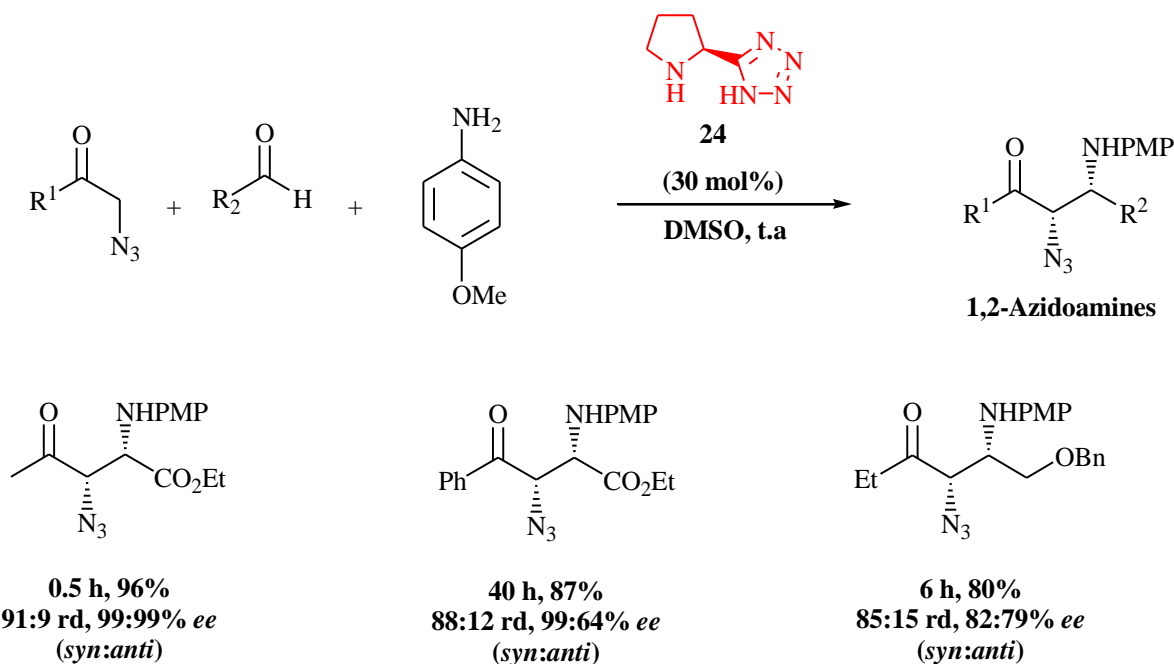


Schéma 24

La diastériorélectivité *syn* obtenue avec la proline ou ses dérivés est inverse à celle observée avec ces mêmes catalyseurs lors des réactions d'aldolisation (voir Schéma 18 et 19).

Des nouveaux catalyseurs ont été synthétisés afin d'obtenir les adduits de configuration relative inverse *anti* (nommé couramment réaction anti-Mannich).⁴³ Ainsi le catalyseur **25** possédant un groupement encombrant en alpha de l'azote tel un groupement méthyle, est capable de catalyser une réaction de Mannich indirecte entre différents aldéhydes et l' α -imine du glyoxylate d'éthyle protégée **26**⁴⁴, pour donner les α -aminoesters correspondants avec une excellente énantiosélectivité et une haute diastéréosélectivité *anti* (Schéma 25).

Selon les auteurs, la diastéréosélectivité *anti* serait principalement due à la présence du groupement méthyle en position 5 du catalyseur. Le schéma suivant permet de rationaliser les résultats selon le type de catalyseur utilisé. Alors que la formation de l'énamine *S-trans* est favorisée en présence de la (*S*)-proline afin d'éviter toutes interactions stériques avec le groupement acide carboxylique, elle serait défavorisée en présence du catalyseur **25**. En effet, les

⁴³ a) R. Martín-Rapún, X. Fan, S. Sayalero, M. Bahramnejad, F. Cuevas, M. A. Pericàs, *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 8780-8783; b) H. Zhang, S. Mitsumori, N. Utsumi, M. Imari, N. Garcia-Delgado, M. Mifsud, K. Albertshofer, P. H.-Y. Cheong, K. N. Houk, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 875-886 ; c) L. Cheng, X. Wu, Y. Lu, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, *5*, 1018-1020 ; d) H. Zhang, M. Mifsud, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 9630-9631 ; e) T. Kano, Y. Hato, K. Maruoka, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 8467-8469 ; f) A. Córdova, C. F. Barbas III, *Tetrahedron Lett.* **2002**, *43*, 7749-7752.

⁴⁴ S. Mitsumori, H. Zhang, P. Ha-Yeon Cheong, K. N. Houk, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 1040-1041.

Introduction

interactions stériques de l'énamine *S-trans* avec le groupement méthyle en position 5 du catalyseur permettrait l'isomérisation de cette dernière en énamine *S-cis*. Le groupement acide carboxylique sur la position 3 permettrait de contrôler, quant à lui, la sélectivité d'attaque faciale de l'énamine durant l'état de transition.

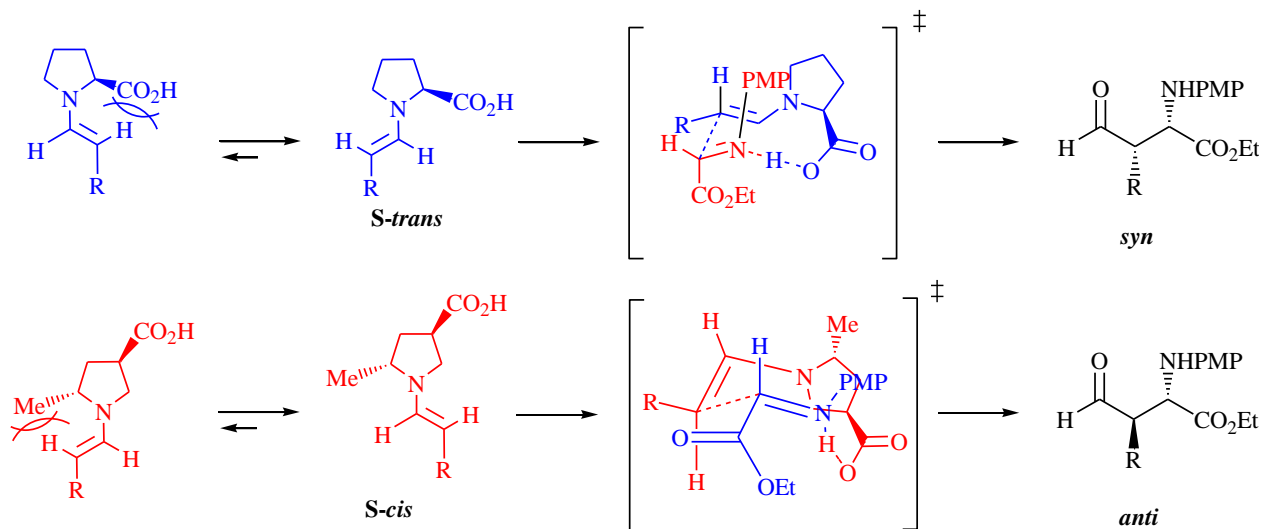
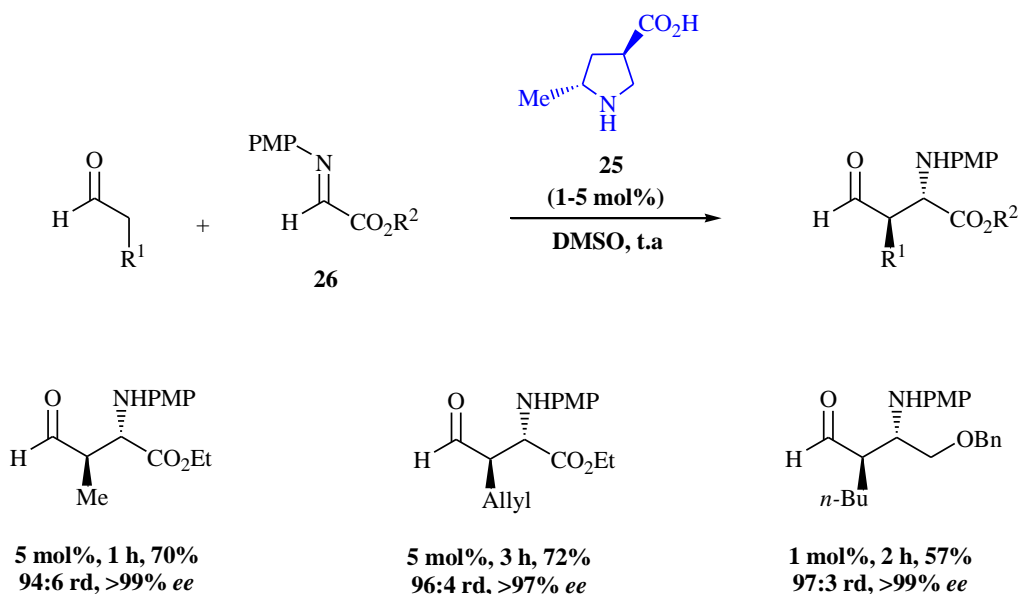


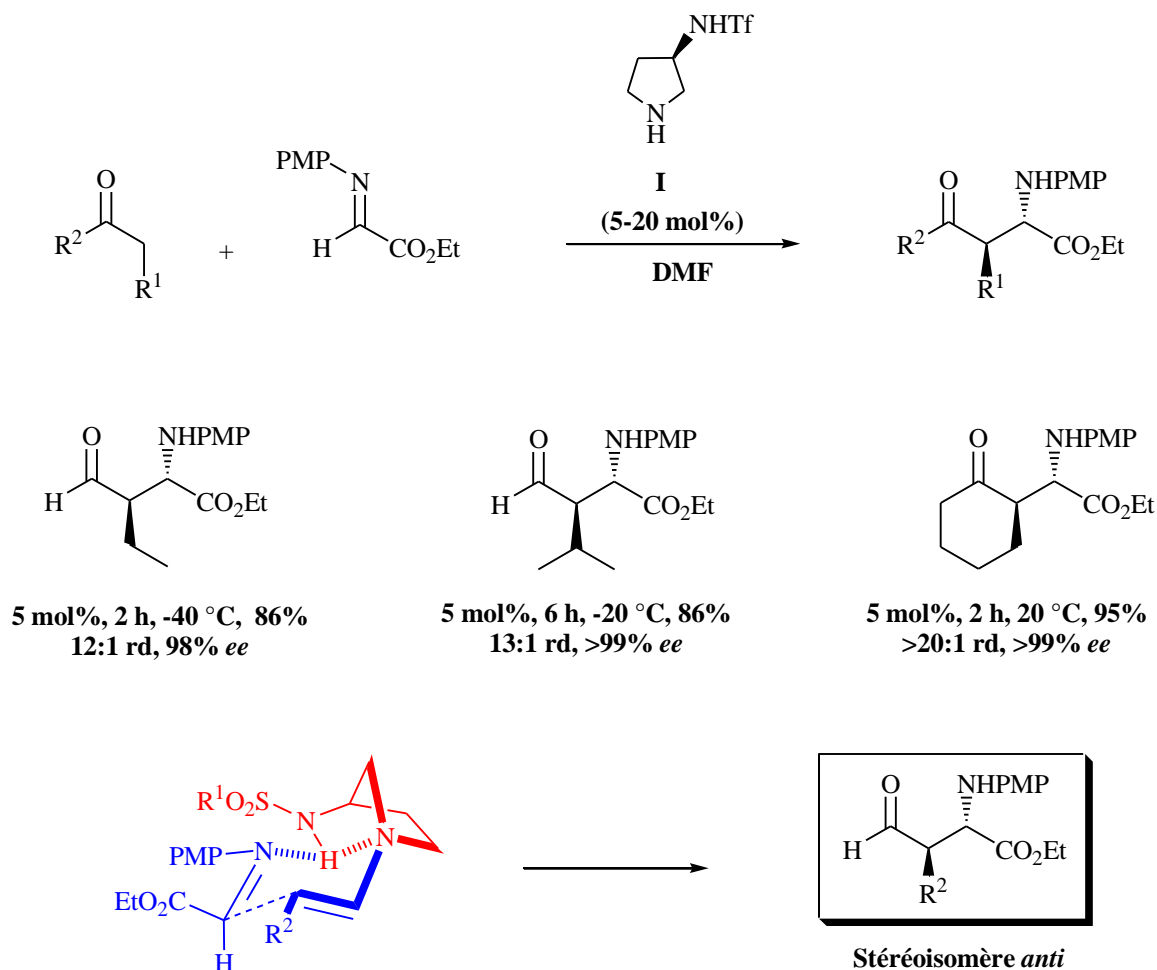
Schéma 25

Cette sélectivité *anti* a été également observée par l'équipe de Rouden en 2008.⁴⁵ Les réactions de Mannich entre les α-imines de glyoxylate d'éthyle et différents aldéhydes sont catalysées par la pyrrolidine substituée, en position 3, par un groupement trifluorométhanesulfonamide (Schéma

⁴⁵ M. Pouliquen, J. Blanchet, M.-C. Lasne, J. Rouden, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 1029-1032.

Introduction

26). Les réactions se sont révélées efficaces, avec des rendements élevés, et très stéréosélectives avec des excès énantiomériques supérieurs à 98%. De plus, la synthèse du catalyseur ne requiert que deux étapes à partir de la 3-aminopyrrolidine commerciale.



Les auteurs ont montré que la sélectivité de la réaction est principalement due à l'acidité élevée du proton sulfonamide car le remplacement du groupement trifluorométhanesulfonyle par des groupements méthanesulfonyle ou 4-nitrobenzènesulfonyle conduit à une forte diminution de l'énantiosélectivité de la réaction. Afin d'expliquer la sélectivité *anti* de la réaction, les auteurs proposent un état de transition chélaté de type norbornane dans lequel l'hydrogène serait impliqué dans 3 liaisons hydrogènes.

I.C.3. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation

La réaction d'allylation est l'une des réactions d'alkylation les plus intéressantes en chimie organique.⁴⁶ Une fois installée, cette double liaison peut être fonctionnalisée ou modifiée par des réactions telles que les réactions d'époxydation⁴⁷, d'hydrogénation⁴⁸ ou de métathèse.⁴⁹

⁴⁶ M. Yus, J. C. González-Gómez, F. Foubelo, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 7774-7854.

I.C.3.a. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation d'aldéhydes

Cette réaction se révèle toutefois infructueuse en présence d'organocatalyseurs de type pyrrolidine ou proline *via* le principe d'activation par énamine. En effet, seuls les produits de *N*-alkylation des catalyseurs sont observés.⁵⁰

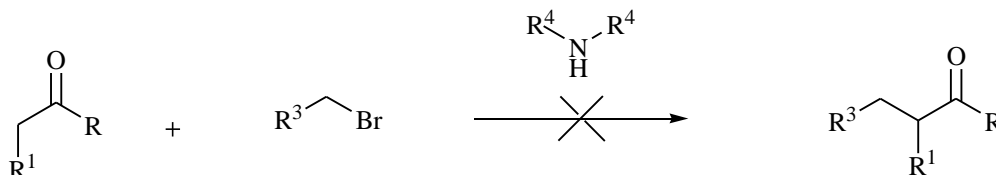


Schéma 27

Basé sur des études de DFT, le groupe de MacMillan a proposé l'imidazolidinone chirale **27**, comme un catalyseur susceptible de réaliser cette transformation *via* un mécanisme d'activation SOMO.¹³

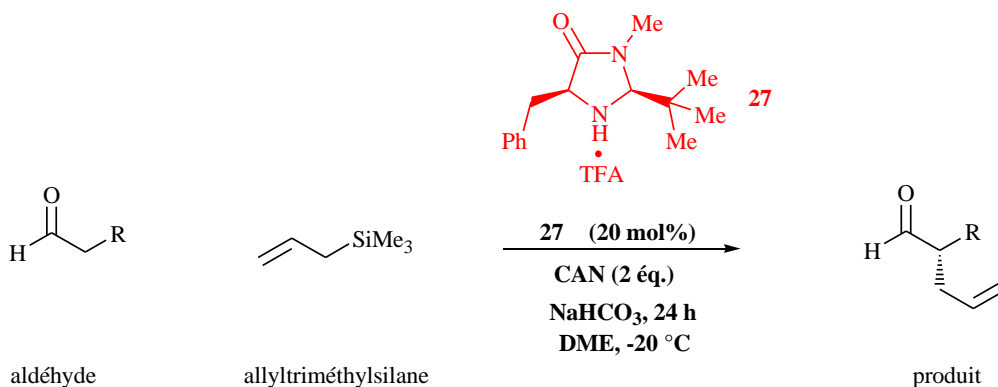
Ainsi, l' α -allylation énantiosélective de différents aldéhydes a été effectuée par l'allyltriméthylsilane en présence de 20 mol% de **27** pour conduire aux produits désirés avec de bons rendements et une excellente énantiosélectivité (Tableau 2).

⁴⁷ M. Colladon, A. Scarso, P. Sgarbossa, R. A. Michelin, G. Strukul, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 14006-14007.

⁴⁸ X. Cui, K. Burgess, *Chem. Rev.* **2005**, *105*, 3272-3296.

⁴⁹ Y. A. Lin, B. G. Davis, *Beilstein J. Org. Chem.* **2010**, *6*, 1219-1228.

⁵⁰ I. Ibrahim, A. Córdova, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 1952-1956.



entrée	aldéhyde	produit	entrée	aldéhyde	produit
1			4		
		81%, 91% ee			72%, 87% ee
2			5		
		75%, 92% ee			75%, 94% ee
3			6		
		72%, 95% ee			70%, 93% ee

Tableau 2

Cette stratégie a pu être étendue avec succès aux réactions d' α -arylation.¹³ En utilisant les mêmes conditions réactionnelles, l'octanal **28** réagit avec le pyrrole protégé sous forme de *N*-tert-butyl carbamate **29** pour conduire au produit **30** avec un bon excès énantiomérique (Schéma 28).

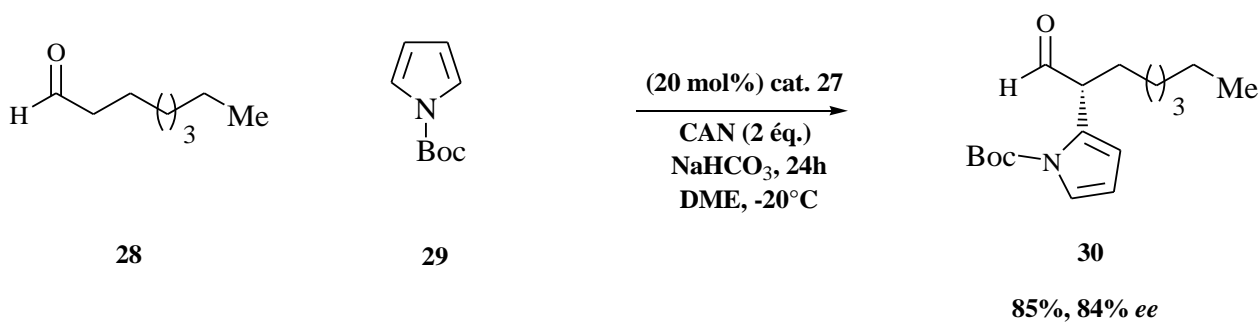


Schéma 28

Introduction

Il faut mentionner que des solvants autres que le 1,2-diméthoxyéthane (DME) peuvent être utilisés (e.g. tétrahydrofurane, CH_2Cl_2 , acétate d'éthyle) et que l'introduction de 1 à 5 équivalents d'eau sont nécessaires afin d'obtenir une efficacité catalytique optimale.

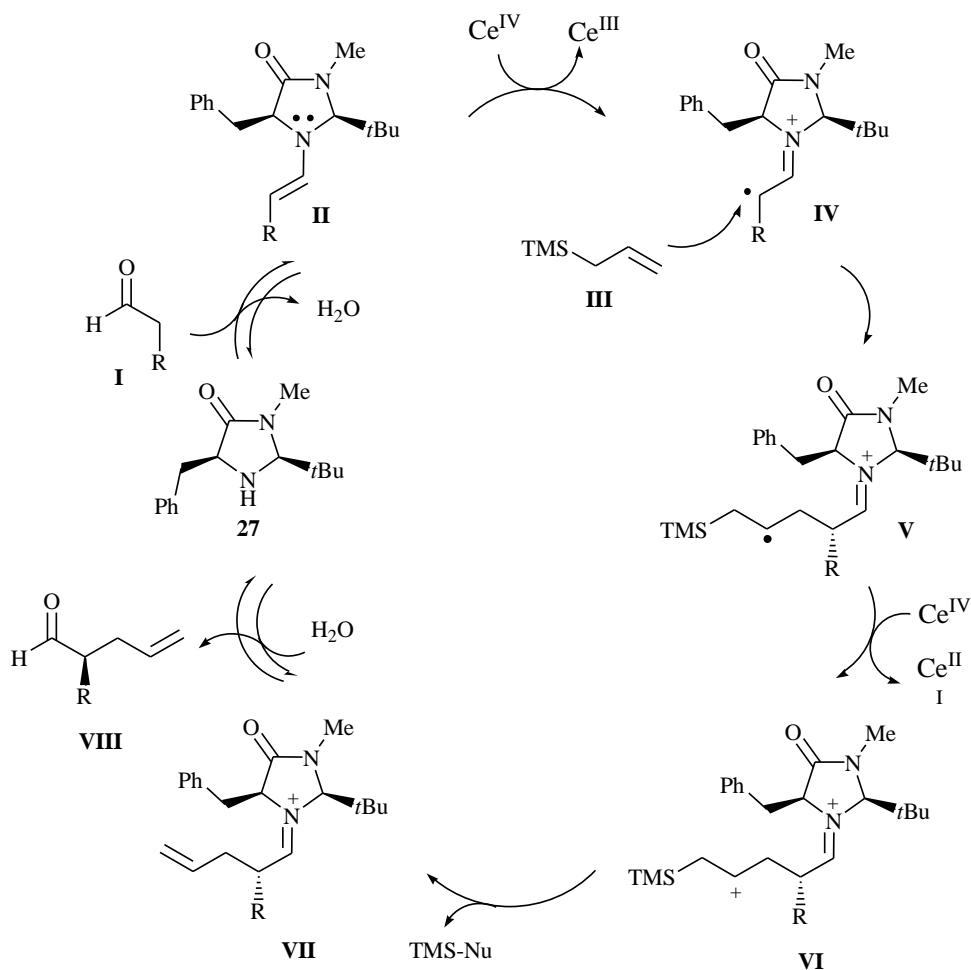


Schéma 29

Le mécanisme complexe de cette activation SOMO a été étudié en détail par le même groupe.⁵¹ Grâce à des données spectroscopiques et cinétiques, les auteurs ont réussi à élucider le rôle de chaque réactif impliqué dans la réaction et par conséquent à proposer un cycle catalytique (Schéma 29) pour la réaction d' α -allylation d'aldéhydes. La réaction de l'aldéhyde **I** avec l'imidazolidinone **27** fournit l'énamine **II** de configuration *E* via un intermédiaire iminium. L'énamine *E* est formée préférentiellement afin d'éviter les interactions stériques avec le groupement *tert*-butyle. Ensuite, le cérium (+IV), provenant du CAN, oxyde l'énamine **II** pour donner le radical cation **IV**. Cette étape s'avère délicate car le CAN doit sélectivement oxyder l'énamine **II** et non pas l'aldéhyde **I** ou l'organocatalyseur **27**. Cette oxydation sélective est possible lorsque le potentiel d'ionisation (PI) de l'énamine est inférieur au PI de l'aldéhyde et du

⁵¹ J. J. Devery, J. C. Conrad, D. W. C. MacMillan, R. A. Flowers, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 6106-6110.

Introduction

catalyseur **27**. Cette étape représente l'étape limitante du cycle catalytique. La réaction entre l'allylsilane **III** et **IV** fournit l'intermédiaire **V**, qui à son tour sera oxydé par un second équivalent de Ce(+IV) aboutissant au cation **VI**. Cet intermédiaire a été récemment mis en évidence par une étude de spectroscopie de masse *via* la méthode d'ionisation par électrospray en mode positif.⁵² Une réaction de β -élimination du cation triméthylsilyle par un nucléophile présent dans la solution (e.g. H₂O, ion nitrate, etc...) conduit à l'iminium **VII**, qui sera hydrolysé par une molécule d'eau pour conduire à l'aldéhyde α -allylé. Cette réaction d'hydrolyse permettra également de régénérer le catalyseur **27** et libère un proton qui doit être neutralisé par une base (NaHCO₃) pour empêcher la protonation de l'azote du catalyseur qui le désactiverait. Idéalement, le cycle catalytique SOMO nécessite une molécule d'H₂O générée lors de la formation de **II** et est consommée lors de l'hydrolyse de **VII**. Cependant, le CAN étant oxophile, il est possible que l'eau générée au début du cycle catalytique soit coordonnée au métal empêchant ainsi l'hydrolyse de l'iminium **VII**. En optimisant la quantité d'eau ajoutée au milieu réactionnel, soit deux équivalents d'H₂O par cycle catalytique, le temps de réaction est considérablement réduit de 24h à 8h. L'ajout d'un grand excès d'eau a par contre un effet négatif sur la formation de l'énamine **II**, car l'équilibre sera fortement déplacé vers la formation de **I** et **27** et ainsi une diminution de la vitesse de réaction sera observée.

La structure du catalyseur **27** influe directement sur la géométrie de l'énamine **II** et donc sur le contrôle de la sélectivité de ces réactions.

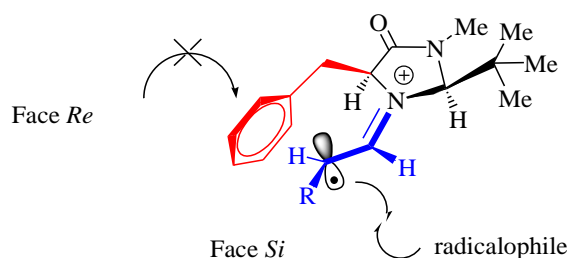


Schéma 30

Comme le schéma 30 le montre, la formation hautement énantiosélective de la liaison est principalement due à la présence des groupements en position 2 et 5 du catalyseur. En effet, la présence du groupement *tert*-butyle en position 2 du cycle conduit à la formation sélective de l'énamine de configuration *E* dans laquelle les interactions stériques sont minimisées. Le groupement benzyle en position 5, quant à lui, permet une discrimination faciale de l'attaque radicalaire par encombrement de la face *Re*.

⁵² R. Beel, S. Kobialka, M. L. Schmidt, M. Engeser, *Chem. Commun.* **2011**, 47, 3293-3295.

Introduction

L'activation SOMO pour la fonctionalisation des aldéhydes en alpha ne se limite pas aux réactions d'allylation, mais peut être appliquée avec succès dans les réactions d' α -vinylation⁵³, d' α -chloration⁵⁴ et d' α -nitroalkylation.⁵⁵

I.C.3.b. La réaction d' α -allylation et d' α -arylation de cétones

Les réactions d' α -allylation par activation SOMO ont été étendues aux cétones en utilisant une nouvelle génération d'organocatalyseur à base d'imidazolidinone. Le schéma 31 représente un exemple de réaction entre la cyclohexanone et l'allylsilane en utilisant les organocatalyseurs **32**, **33** et **34** qui conduit à la formation énantiosélective de la 2-allylcyclohexanone **31**.⁵⁶

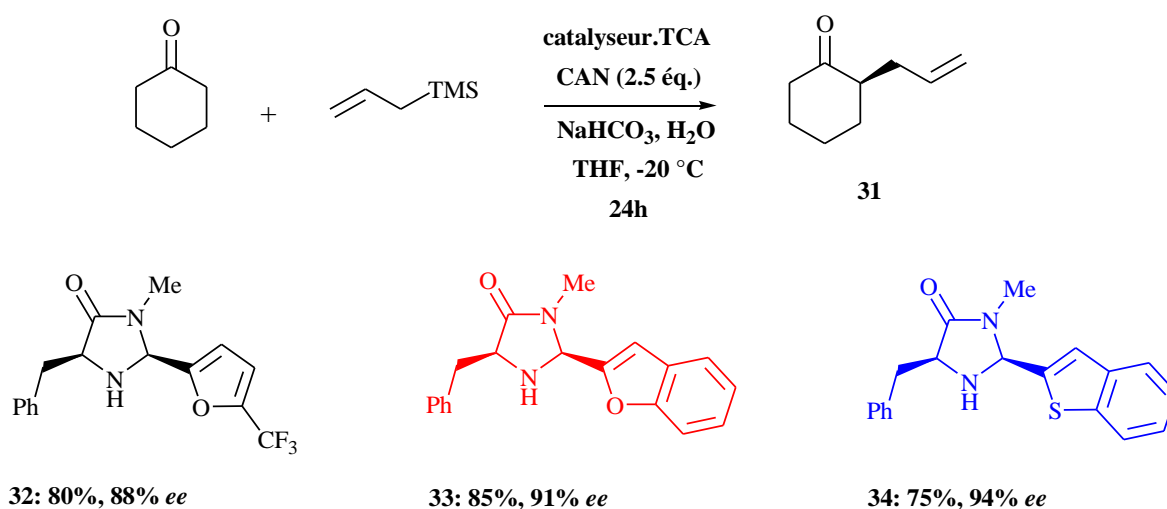


Schéma 31

Ces réactions tolèrent des allylsilanes enrichis ou appauvris en électrons, des cétones à quatre, cinq ou six chaînons ainsi que des cétones β et γ substituées et comportant un hétéroatome (e.g. azote, oxygène). Cependant, il faut mentionner que deux équivalents de cétone sont utilisés pour un équivalent d'allylsilane. Des réactions d' α -homobenzoylation peuvent être initiées par l'organocatalyseur **34** en présence de styrène **35** alors que le dérivé silylé **36** permet de catalyser des réactions d' α -énolisation. Les schémas ci-dessous représentent un exemple de ces deux types de réactions.

⁵³ H. Kim, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *130*, 398-399.

⁵⁴ a) M. Amatore, T. D. Beeson, S. P. Brown, D. W. C. MacMillan, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 5121-5124; b) M. P. Brochu, S. P. Brown, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 4108-4109.

⁵⁵ J. E. Wilson, A. D. Casarez, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 11332-11334.

⁵⁶ A. Mastracchio, A. A. Warkentin, A. M. Walji, D. W. C. MacMillan, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **2010**, *107*, 20648-20651.

Réaction d' α -homobenzylation

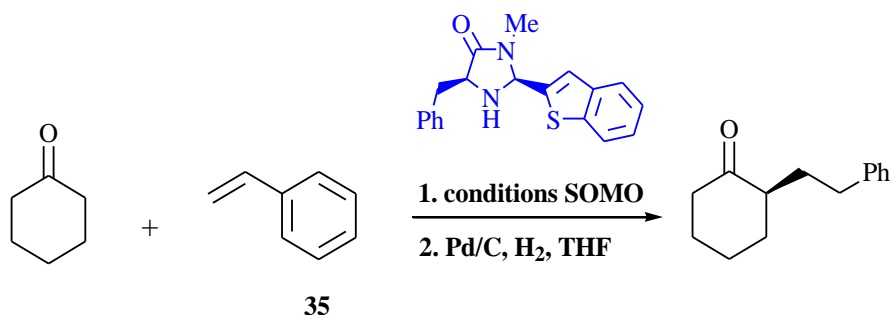


Schéma 32

Réaction d' α -énolation

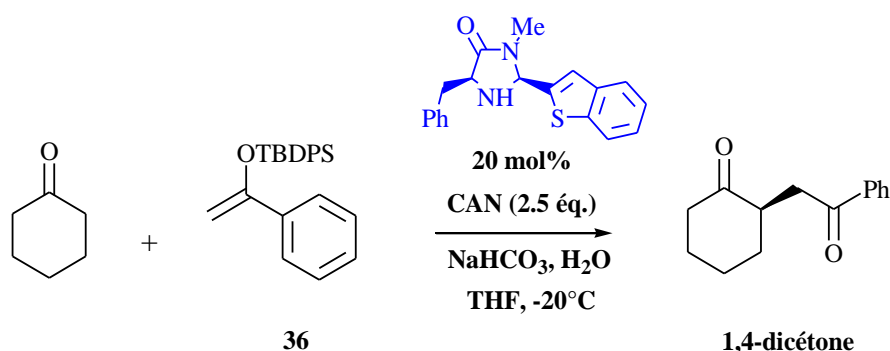


Schéma 33

I.C.4. La réaction d' α -alkylation

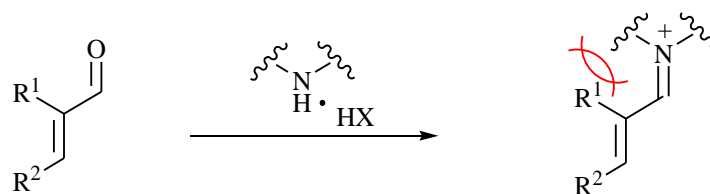
En 2008, Nicewicz et MacMillan associe l'organocatalyse à la catalyse photorédox afin de réaliser des réactions d' α -alkylation énantiosélective d'aldéhydes.⁵⁷ Cette approche met en jeu la catalyse selon une activation par énamine. Cette entité réagit avec un radical alkyle appauvri en électrons, issus de composés carbonylés α -bromés tels que le bromomalonate de diéthyle, la bromoacétophénone, etc... générant un radical alpha-aminé qui peut être oxydé par un complexe de ruthénium (Ru(bpy)₃Cl₂) en présence d'une source de photon (lampe fluorescente à usage domestique). Comparée à l'activation SOMO mentionnée précédemment dans laquelle une quantité stoechiométrique d'oxydant (CAN) était nécessaire, cette double catalyse ne requiert qu'une quantité catalytique d'oxydant limitant la formation de produits secondaires.⁵⁸

⁵⁷ D. A. Nicewicz, D. W. C. MacMillan, *Science* **2008**, 322, 77-80.

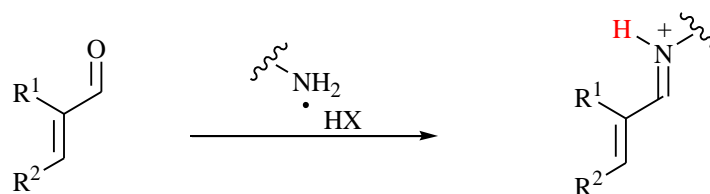
⁵⁸ P. Renaud, P. Leong, *Science* **2008**, 322, 55-56.

I.D. La catalyse par les amines primaires chirales

L'organocatalyse par les amines primaires est souvent complémentaire à celle des amines secondaires et a permis d'étendre le champ d'application de l'activation *via* un iminium.⁵⁹ Même si le principe d'activation entre une amine secondaire et primaire est identique (activation *via* un iminium et/ou une énamine), l'utilisation d'une amine primaire en organocatalyse peut présenter certains avantages. En effet, le degré de substitution de l'azote étant plus faible pour les amines primaires que secondaires, la formation de l'intermédiaire catalytique actif peut être facilitée (Schéma 34). Ainsi, même si des dérivés de la proline catalysent des réactions d'addition de type Michael⁶⁰, l'utilisation de catalyseurs possédant une fonction amine primaire s'avèrent souvent plus efficaces pour l'activation de cétones ou aldéhydes α,β -insaturés et α -substitués. De plus, la présence d'un hydrogène peut en même temps contrôler la formation de l'énamine et la stéréosélectivité de la réaction.⁶¹



Catalyse par amine secondaire



Catalyse par amine primaire

Schéma 34

⁵⁹ John B. Brazier, Nicholas C.O. Tomkinson, "Secondary and Primary Amine Catalysts for Iminium Catalysis" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2010**.

⁶⁰ M.-Y. Han, Y. Zhang, H.-Z. Wang, W.-K. An, B.-C. Ma, Y. Zhang, W. Wang, *Adv. Synth. Catal.* **2012**, 354, 2635-2640.

⁶¹ L.-W. Xu, J. Luo, Y. Lu, *Chem. Commun.* **2009**, 1807-1821.

I.D.1. La réaction de Michael

La réaction de Michael, nommé d'après le nom du chimiste Arthur Michael, met en jeu un nucléophile qui s'additionne sur une double liaison conjuguée (composé α,β -insaturé).⁶² La particularité de cette réaction réside dans le fait qu'elle peut être catalysée soit par activation de l'espèce nucléophile *via* une catalyse de type énamine soit par activation de l'accepteur de Michael (espèce électrophile) *via* une catalyse de type iminium.⁹

I.D.1.a. La réaction de Michael par une activation de type énamine du nucléophile

McCooey et Cannon⁶³ ont testé une série d'organocatalyseurs de type alcaloïde dérivé de la Cinchona et ont trouvé que le 9-*epi*-DHQDA **37**, en présence d'acide benzoïque comme co-catalyseur, était capable de réaliser l'addition d'aldéhydes α et α,α -disubstitués sur le nitrostyrène **38** pour fournir les adduits de Michael avec des excellents rendements et énantiosélectivités.

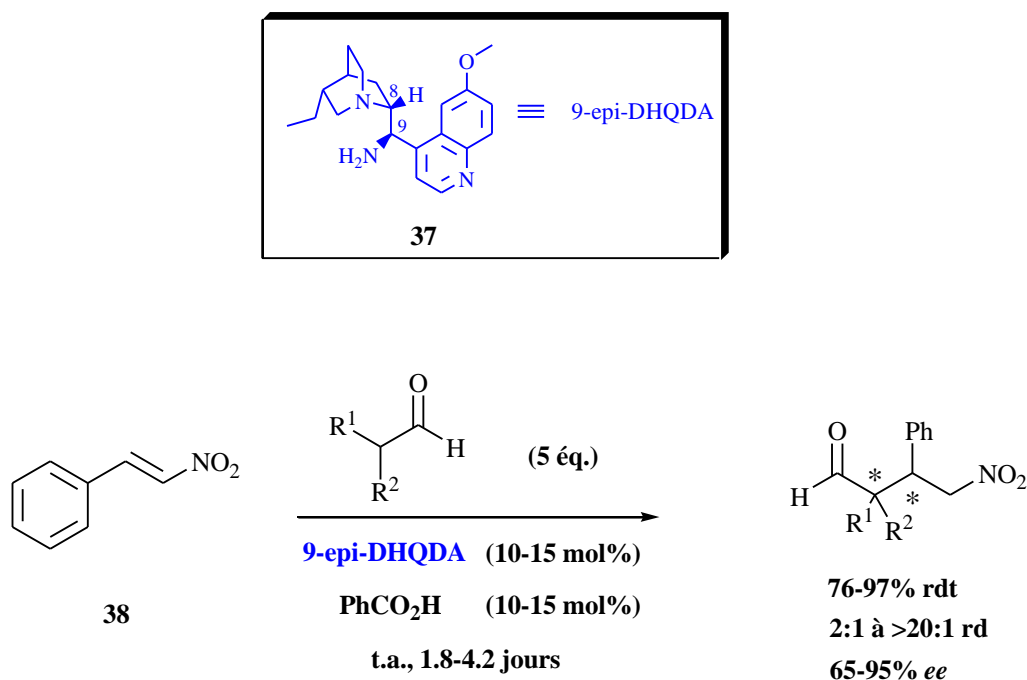


Schéma 35

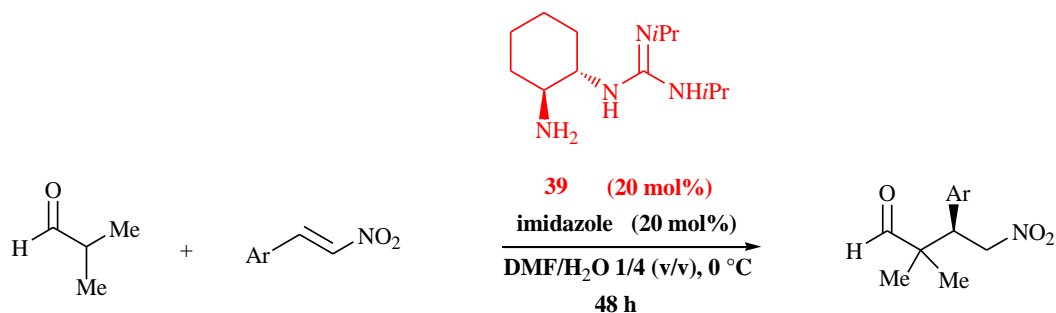
Selon les auteurs, les énantio- et diastéréosélectivités (*syn*) observées durant cette réaction sont dues à la formation d'une énamine de configuration (*E*) et à la formation d'une liaison hydrogène intermoléculaire entre l'azote tertiaire protoné du noyau quinuclidine et un oxygène du groupement nitro du nitrostyrène **38**.

⁶² Pour des revues, voir: a) B. D. Mather, K. Viswanathan, K. M. Miller, T. E. Long, *Prog. Polym. Sci.* **2006**, *31*, 487-531; b) Y. Zhang, W. Wang, *Catal. Sci. Technol.* **2012**, *2*, 42-53.

⁶³ S. H. McCooey, S. J. Connon, *Org. Lett.* **2007**, *9*, 599-602.

Introduction

Récemment, un organocatalyseur type amine primaire-guanidine **39** s'est montré performant dans la réaction d'addition de l'isobutyraldéhyde sur une série de *trans*- β -nitroalcènes en présence d'un additif.⁶⁴ Parmi les différents additifs testés, comme la triéthylamine, le 1,8-diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ène (DBU) et le 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane (DABCO), l'imidazole s'est révélé le plus efficace. La présence d'un co-catalyseur acide, comme l'acide benzoïque, inhibe la réaction.



entrée	Ar	rendement %	% ee
1	Ph	90	80
2	4-MeOC ₆ H ₄	89	75
3	4-BrC ₆ H ₄	70	65
4	4-NO ₂ C ₆ H ₄	85	80
5	3-Pyridinyl	91	80
6	2-Furanyl	95	70

Tableau 3

Dans tous les cas, les adduits de Michael isolés possèdent un centre stéréogène de configuration (*R*). En réalisant des calculs DFT, les auteurs ont trouvé que, dans l'état de transition, la partie guanidine du catalyseur ne participait pas à la formation d'une liaison hydrogène intramoléculaire avec le groupement nitro du *trans*- β -nitroalcène, car dans ce cas, l'adduit de Michael formé aurait dû avoir une configuration (*S*), inverse à celle observée expérimentalement. L'état de transition proposé suppose des liaisons hydrogène intermoléculaires entre le groupement nitro et les molécules d'eau du solvant.

⁶⁴ A. Avila, R. Chinchilla, B. Fiser, E. Gómez-Bengoia, C. Nájera, *Tetrahedron: Asymmetry* **2014**, 25, 462-467.

I.D.1.b. La réaction de Michael par une activation de type iminium de l'accepteur

Melchiorre et *coll.* ont rapporté, pour la première fois, un catalyseur bi-fonctionnel **40** combinant les fonctions amine primaire et thiourée qui catalyse l'addition conjuguée asymétrique des dérivés d'oxindoles **41** sur des aldéhydes α,β -insaturés **42** via une activation de type iminium.⁶⁵

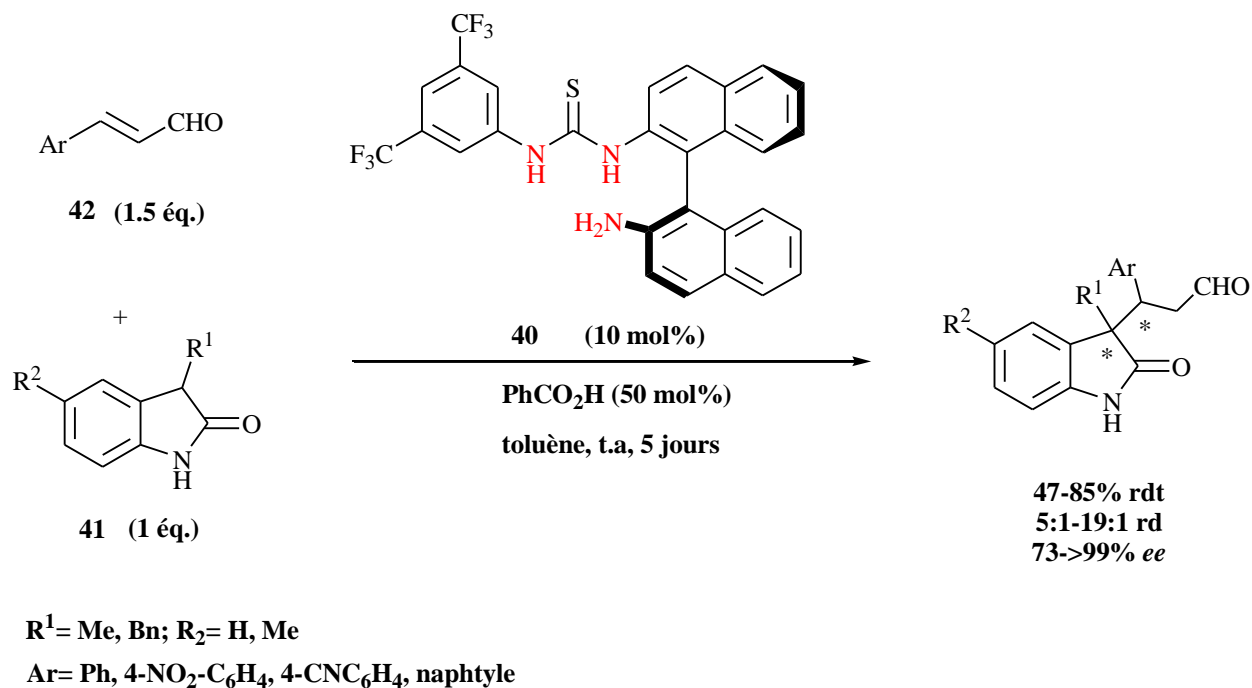


Schéma 36

La haute diastéréosélectivité obtenue dans les produits d'addition rend ce catalyseur particulièrement intéressant comparé aux dérivés de la (*S*)-proline qui, dans cette réaction, conduit aux adduits désirés avec une bonne énantiosélectivité mais sans contrôle de la diastéréosélectivité.⁶² Les auteurs ont montré que le remplacement de la fonction amine primaire par une amine tertiaire ($-N(\text{Me})_2$) conduit à la perte complète de l'activité catalytique de **40** démontrant ainsi une activation de type iminium. Le groupement thiourée, quant à lui, activerait l'oxindole en stabilisant sa forme énol par liaison hydrogène permettant ainsi de contrôler la stéréosélectivité de la réaction.

⁶⁵ P. Galzerano, G. Bencivenni, F. Pesciaioli, A. Mazzanti, B. Giannichi, L. Sambri, G. Bartoli, P. Melchiorre, *Chem. Eur. J.* **2009**, *15*, 7846-7849.

Introduction

Un exemple de réaction d'addition conjuguée asymétrique intramoléculaire a été décrit par un groupe chinois en 2013 en utilisant la (1*R*, 2*R*)-diphényléthylènediamine ((*R,R*)-DPEN) **43** accompagné d'un co-catalyseur acide, la *N*-Boc-*L*-proline **44**.⁶⁶

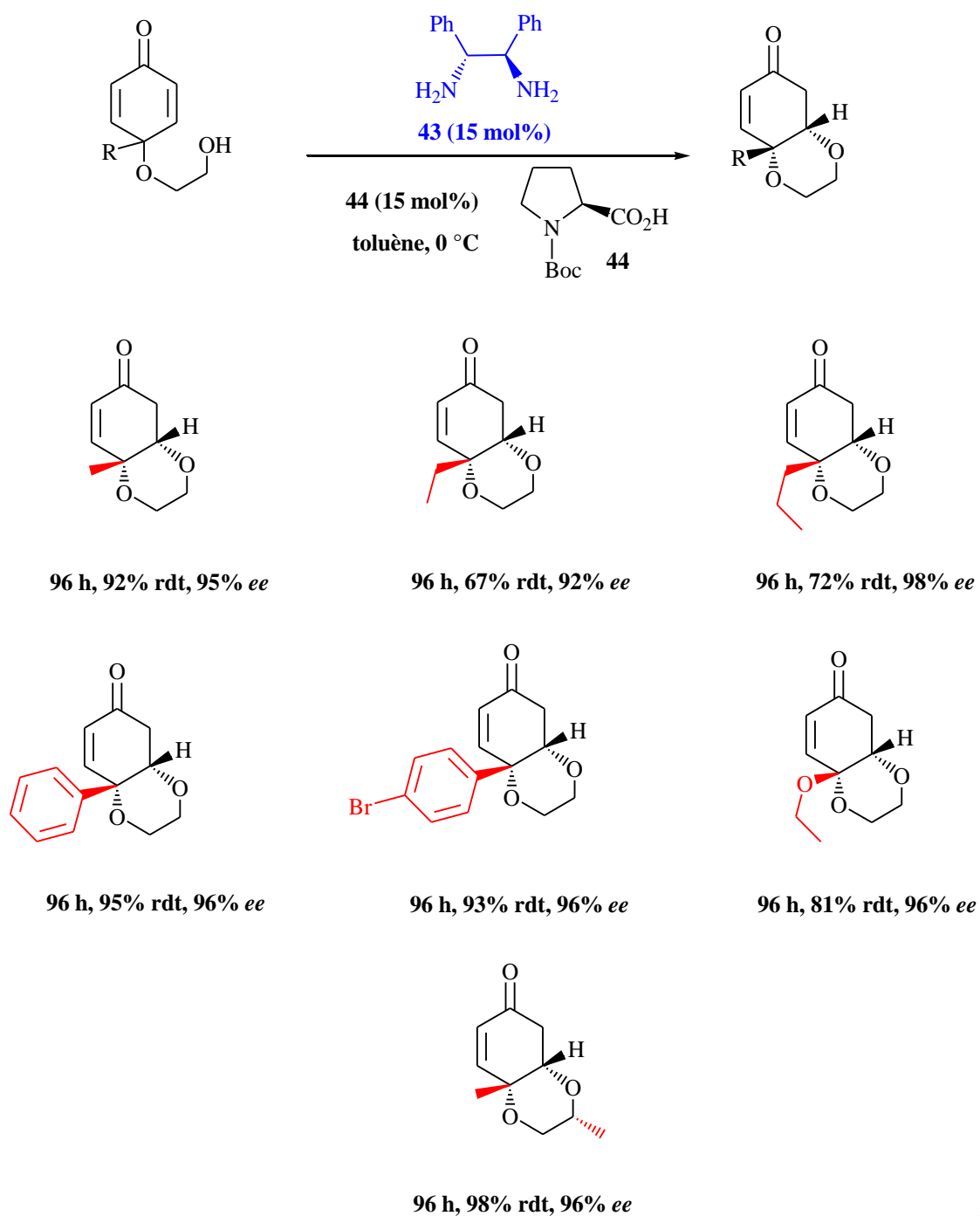


Schéma 37

⁶⁶ W. Wu, X. Li, H. Huang, X. Yuan, J. Lu, K. Zhu, J. Ye, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, 52, 1743-1747.

Comme le schéma 37 le montre, la réaction d'oxa-Michael réalisée *via* une activation iminium tolère des groupements alkyles, alkoxy et des aromatiques substitués par des groupements donneurs et électroattracteurs sur la position 4 de la cyclohexadiènone, conduisant aux produits bicycliques avec une excellente énantiosélectivité >92% *ee*.

I.D.2. Les réactions de cycloaddition

Les réactions de cycloaddition sont des réactions dans lesquelles deux ou plusieurs systèmes π se combinent pour former une molécule cyclique stable, au cours de laquelle des liaisons de type sigma sont formées. Un mécanisme concerté nécessite un état de transition simple et sans intermédiaire. Les deux principales réactions de cycloaddition dont le mécanisme concerté implique un composant contenant 4 électrons π et un autre de 2 électrons π sont les réactions de Diels-Alder et les réactions de cycloaddition 1,3-dipolaire.⁶⁷

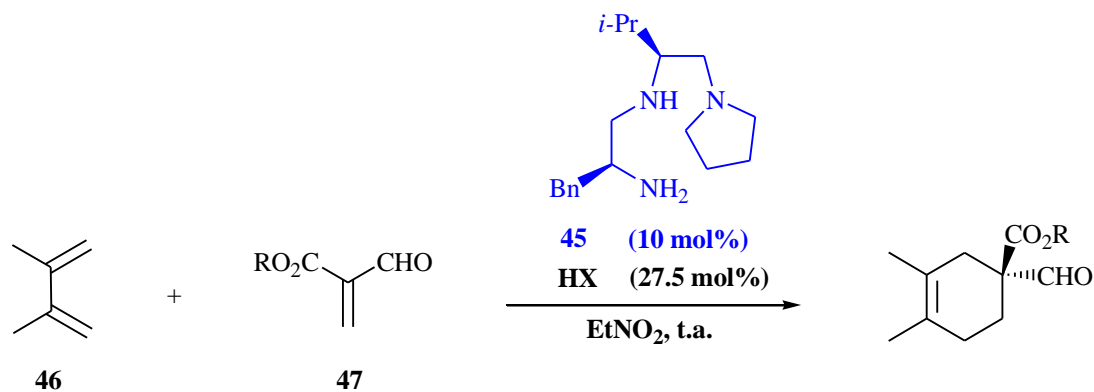
I.D.2.a. La réaction de Diels-Alder

La réaction de Diels-Alder est une réaction mettant en jeu un diène, en général enrichi en électrons, et un diénophile, espèce appauvrie en électron. L'acroléine est souvent choisie comme diénophile de choix pour ce type de réaction. Les premières réactions de Diels-Alder énantiosélectives organocatalysées ont été rapportées par le groupe de MacMillan. Les catalyseurs utilisés sont des dérivés de la (*S*)-phénylalanine, possédant une fonction amine secondaire, pour activer les énals³ et les ènonés.⁶⁸ Par contre, lorsque l'acroléine est α -substituée, les activations de type iminium catalysées par les amines secondaires se révèlent difficiles pour des raisons d'encombrement stérique. Les amines primaires présentent donc une alternative intéressante pour activer ces diénophiles. Ainsi, en 2005, Ishihara et *al.*⁶⁹ ont trouvé que la triamine **45** pouvait catalyser la réaction entre le 2,3-diméthylbutadiène **46** et des diénophiles de type acroléine α -substituée **47** en présence d'un co-catalyseur acide (HX) (Tableau 4).

⁶⁷ K. M. Lokanatha Rai, "Heterocycles via Oxime Cycloadditions" in *Synthesis of Heterocycles via Cycloadditions I- Topics in Heterocyclic Chemistry*, Vol. 12, A. Hassner, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2008**

⁶⁸ A. B. Northrup, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 2458-2460.

⁶⁹ K. Ishihara, K. Nakano, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 10504-10505.

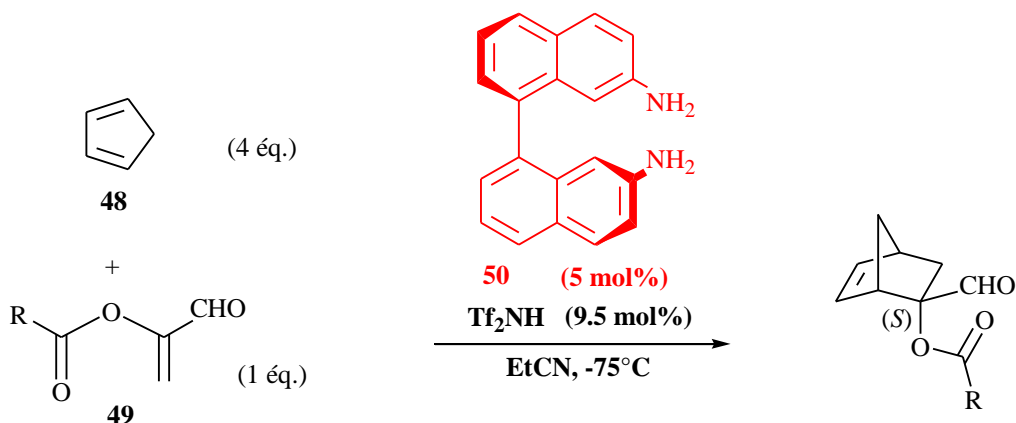


entrée	R	HX	temps (h)	rendement %	% ee
1	<i>p</i> -MeOC ₆ H ₄	C ₆ H ₅ SO ₃ H	8	>99	90
2	Ph	C ₆ H ₅ SO ₃ H	16	97	87
3	Ph	TsOH	15	60	78
4	Me	2,4-(NO ₂) ₂ C ₆ H ₃ SO ₃ H	24	56	83

Tableau 4

Les adduits *endo* sont obtenus avec de bons rendements et une bonne énantiosélectivité. Les adduits *exo* sont isolés par réaction entre le cyclopentadiène **48** et les acroléines α -oxyacylées **49** en présence de la 1,1'-binaphthyl-2,2'-diamine **50** associée à un co-catalyseur acide, le trifluorométhanesulfonimide (Tf₂NH).⁷⁰

⁷⁰ A. Sakakura, K. Suzuki, K. Ishihara, *Adv. Synth. Catal.* **2006**, 348, 2457-2465.



entrée	R	temps (h)	rendement %	exo/endo	% ee
1	<i>p</i> -MeOC ₆ H ₄	28	48	93:7	94
2	cyclohexyl	24	80	94:6	86
3	<i>p</i> -TIPSOC ₆ H ₄	24	76	93:7	94

Tableau 5

Un mécanisme de la réaction a été proposé en considérant l' α -[*p*-(triisopropylsilyloxy)benzoyl]acroléine (entrée 3, Tableau 5) comme modèle (Schéma 38).

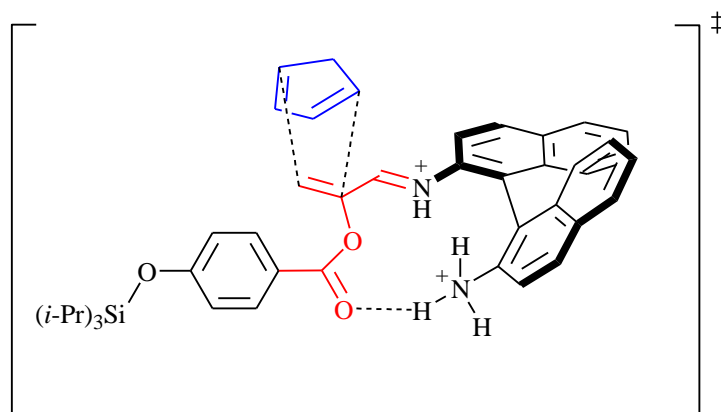


Schéma 38

Dans cet état de transition, une des fonctions amine de **50** forme l'aldimine avec l'acroléine (activée par Tf_2NH) alors que l'autre amine, par réaction acido-basique, forme un sel d'ammonium. Cette entité active le carbonyle du groupement acyloxy par une liaison hydrogène intramolécule. L'approche du cyclopentadiène se fait sur la face *Si* du diénophile, face la moins encombrée conduisant à l'adduit de Diels-Alder *exo*.

1.D.2.b. La réaction de cycloaddition 1,3-dipolaire

Les réactions de cycloaddition 1,3-dipolaire mettent en jeu un dipôle 1,3 et un dipolarophile, très souvent un alcène. L'exemple le plus significatif de réaction d'addition 1,3-dipolaire organocatalysée est celui rapporté par Chen et *al.*⁷¹ Une structure dérivée de la quinine, la 9-amino-9-déoxyépiquinine **51**, est un organocatalyseur potentiel pour la cycloaddition d'énones cycliques **52** avec les imines d'azométhine **53**.

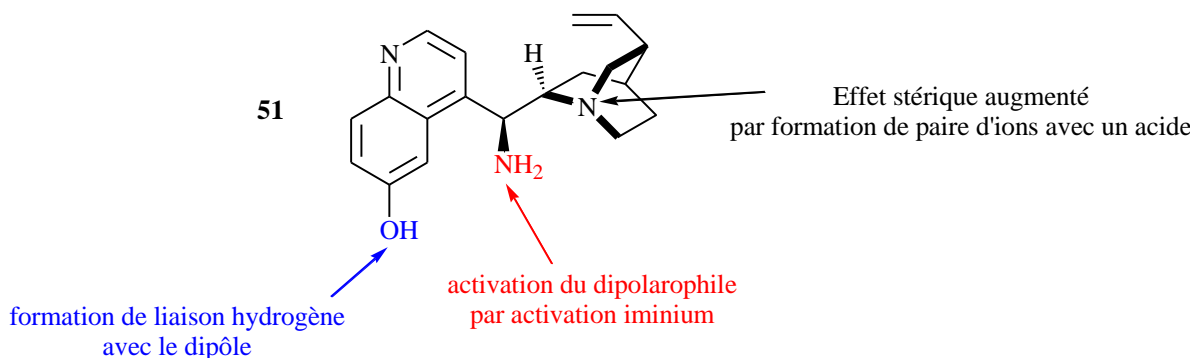


Schéma 39

Les composés hétérocycliques chiraux à 5 chaînons sont obtenus avec une très bonne énantiosélectivité en présence de 20 mol% de l'acide 2,4,6-triisopropylbenzènesulfonique (TIPBA) et de tamis moléculaire 4Å. L'eau générée lors de la formation de l'iminium est ainsi piégée ce qui favorise la réaction et ne perturbe pas la formation éventuelle d'une liaison hydrogène avec le dipôle, responsable de l'énantiosélectivité de la réaction.

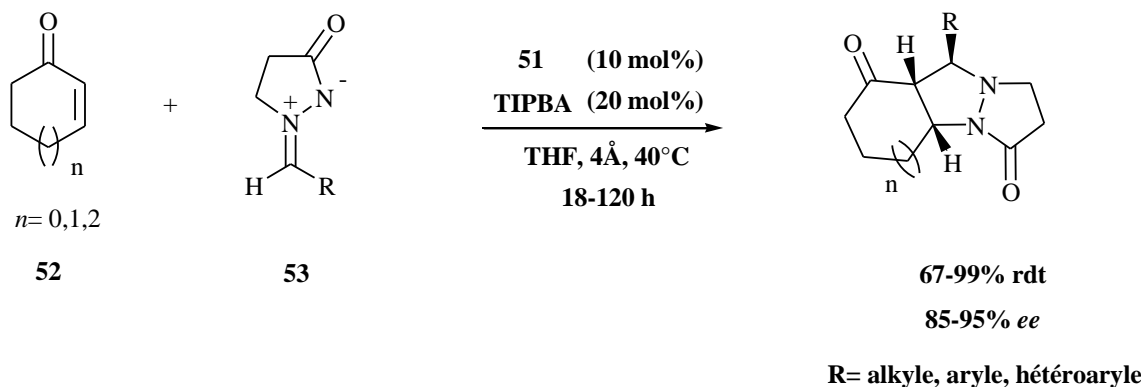


Schéma 40

Il faut mentionner que les imines d'azométhine possédant des groupes électrodonneurs (i.e. R= *p*-MeOC₆H₄) sont les plus réactives et les réactions de cycloaddition seront possibles avec juste 2 mol% de **51**. Pour expliquer la stéréosélectivité obtenue, les auteurs ont proposé un état de transition où l'iminium formé entre l'énone **52** et l'organocatalyseur **51** adopte une configuration

⁷¹ W. Chen, W. Du, Y.-Z. Duan, Y. Wu, S.-Y. Yang, Y.-C. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 7667-7670.

Introduction

trans avec établissement d'une liaison hydrogène entre le groupement hydroxyle de **51** et le groupement carbonyle de **53**. Suite à une gêne stérique introduite par la formation de paires d'ions entre le TIPBA et l'amine tertiaire du noyau quinuclidine, une cycloaddition se produit exclusivement sur la face *Re* avec une diastéréosélectivité *endo*. Le schéma 41 montre cet état de transition concerté en prenant un modèle spécifique comme exemple.

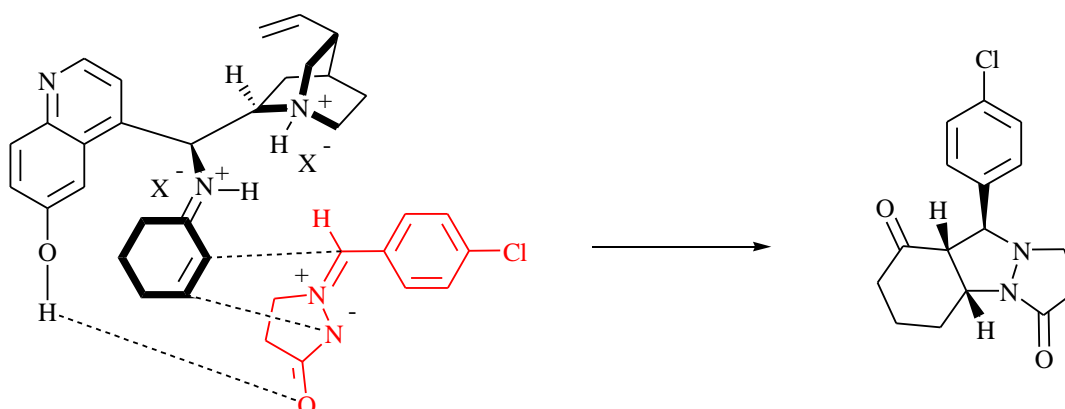


Schéma 41

I.D.3. La réaction d'aldolisation

Les réactions d'aldolisation énantiosélectives citées ci-dessous ont été réalisées avec des organocatalyseurs de nature osidique portant une fonction amine primaire. Ces types de catalyseurs, en rapport direct avec le sujet de cette thèse, seront traités plus en détail dans le chapitre **III**.

Toutefois, le premier exemple d'organocatalyseur de nature saccharidique portant une amine primaire est celui décrit en 2006 par Tripathi et *coll.*⁷² Plusieurs dérivés de sucres sous forme furanique fonctionnalisés ont été testés dans la réaction aldolisation intermoléculaire entre l'acétone et plusieurs aldéhydes aromatiques (Schéma 42).

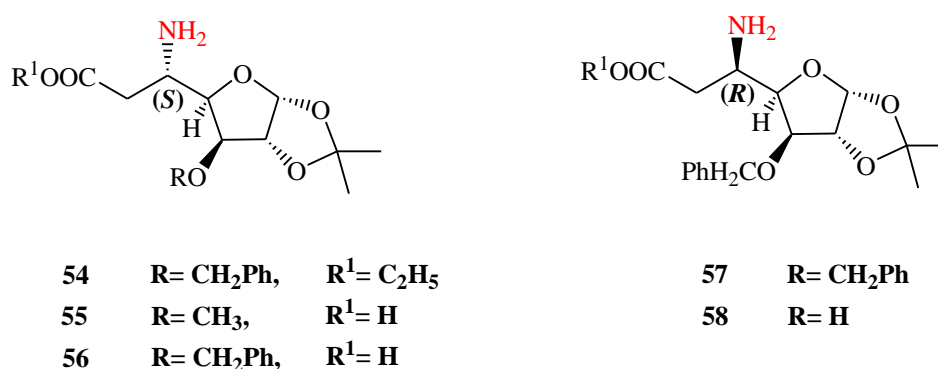


Schéma 42

⁷² N. Dwivedi, S. S. Bisht, R. P. Tripathi, *Carbohydr. Res.* **2006**, *341*, 2737-2743.

Introduction

Seul le catalyseur **56** (l'acide 5-amino-5-désoxy- β -L-ido-(α -D-gluco)-heptofuranuronique) s'est montré efficace en terme de réactivité et de sélectivité. Expérimentalement, le catalyseur **56** s'est révélé plus performant que son diastéréoisomère **58** révélant ainsi l'importance de la configuration absolue du carbone portant la fonction amine.

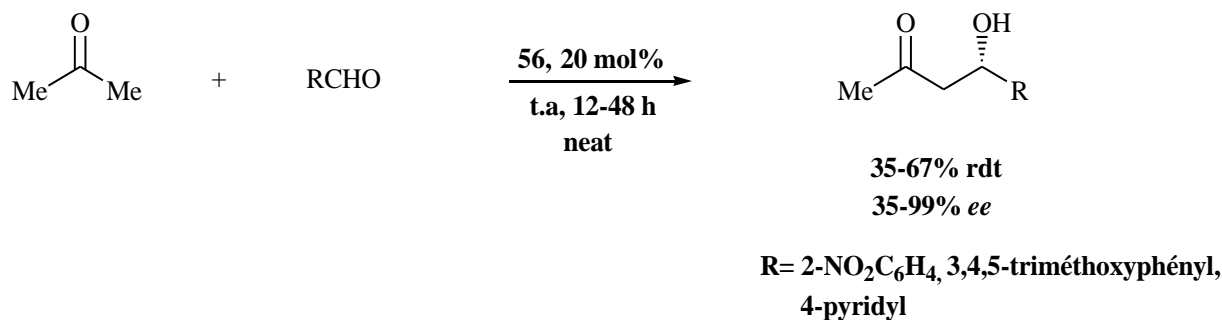


Schéma 43

Le mécanisme proposé est semblable aux réactions d'aldolisation directe catalysées par la (*S*)-proline et ses analogues. Dans un premier temps, la fonction amine primaire de **I** réagit avec l'acétone pour former l'énamine **II**. Cette réaction est facilitée par la liaison hydrogène établie entre le groupement carboxyle de **I** et le carbonyle de l'acétone. L'énantiosélectivité observée dans le produit final **IV** peut être expliquée par la formation d'un état de transition organisé de type Zimmerman-Traxler dans lequel l'hydrogène de l'acide carboxylique interviendrait (structure **III**). La réaction se produit exclusivement sur la face *Si* du carbonyle afin d'éviter les interactions 1,3-diaxiales entre le groupement aromatique de l'aldéhyde et le groupement méthyle de l'énamine (Schémas 44 et 45).

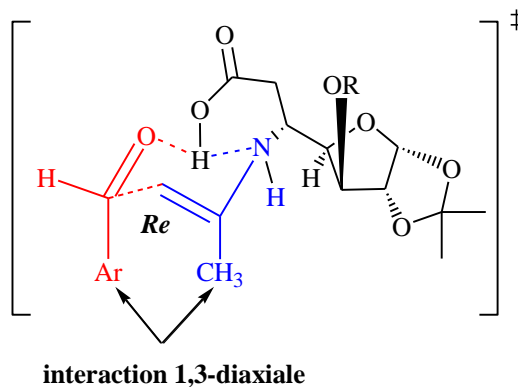
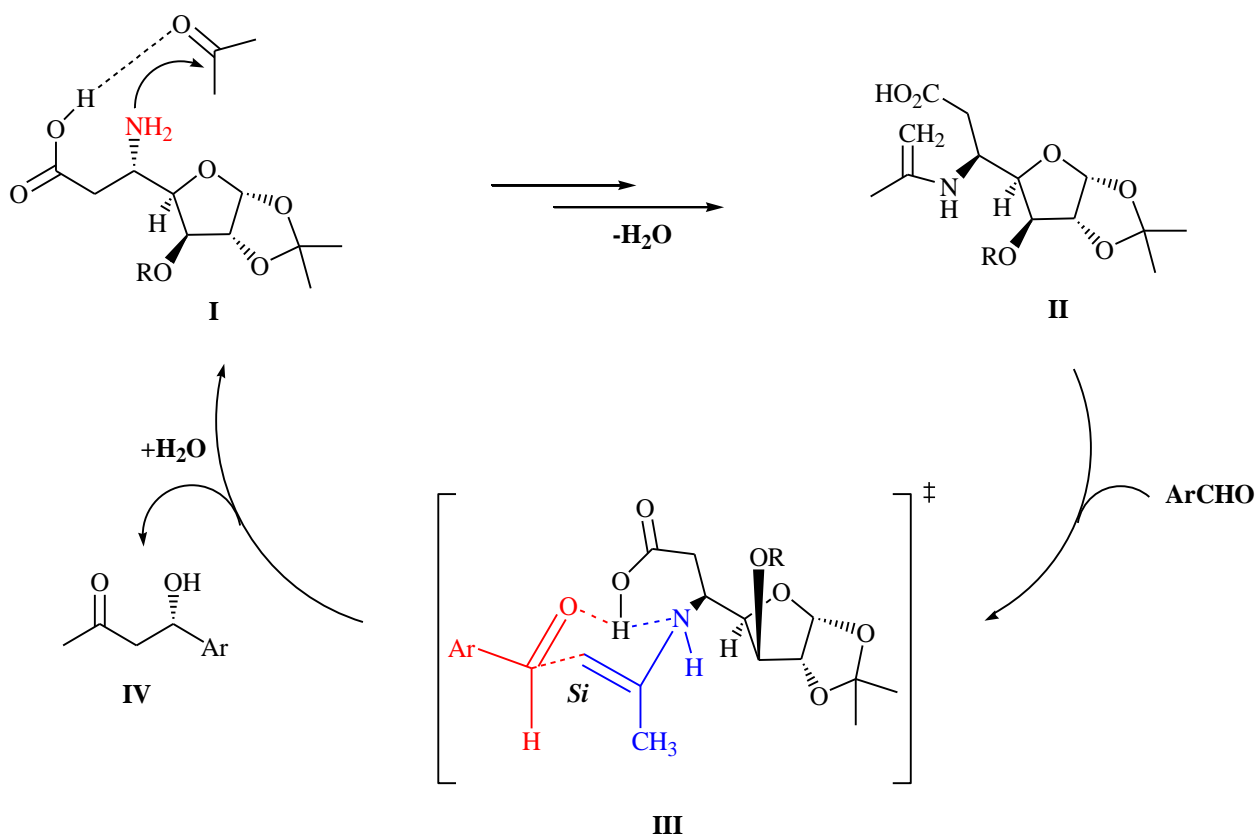


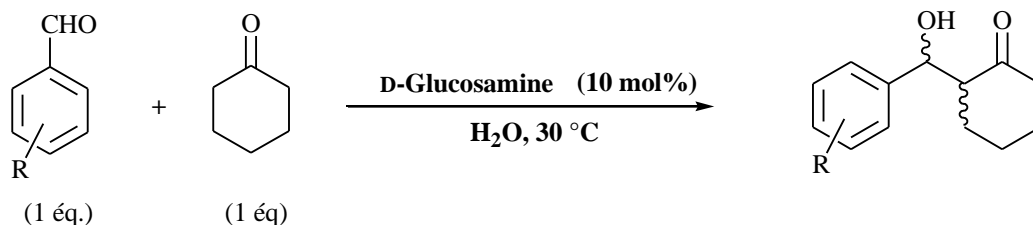
Schéma 45

La même équipe a utilisé un sucre aminé sous forme pyranique, la D-glucosamine, obtenue par neutralisation de son chlorhydrate commercial par NaHCO_3 .⁷³ La réaction d'aldolisation entre la cyclohexanone et divers aldéhydes aromatiques réalisée en présence de 10 mol% de D-glucosamine dissoute dans l'eau, conduit aux adduits d'aldolisation isolés avec de bons

⁷³ N. Singh, J. Pandey, R. P. Tripathi, *Catal. Commun.* **2008**, 9, 743-746.

Introduction

rendements et des diastéréosélectivités modestes. Malheureusement, les auteurs n'ont mentionné aucun excès énantiomérique pour cette réaction.



entrée	R	temps (h)	rendements %	syn/anti
1	H	14	60	0.8:1
2	4-NO ₂	11	75	4:1
3	2-NO ₂	14	38	0.4:1
4	4-Br	17	65	4:1
5	3,4-di-OMe	14	60	0.3:1
6	3,4,5-tri-OMe	14	59	1.6:1

Tableau 6

Les conditions de cette aminocatalyse éco-compatible, dans laquelle les deux partenaires sont utilisés en quantité stoechiométrique, a été appliquée à l'acétone (Schéma 46).

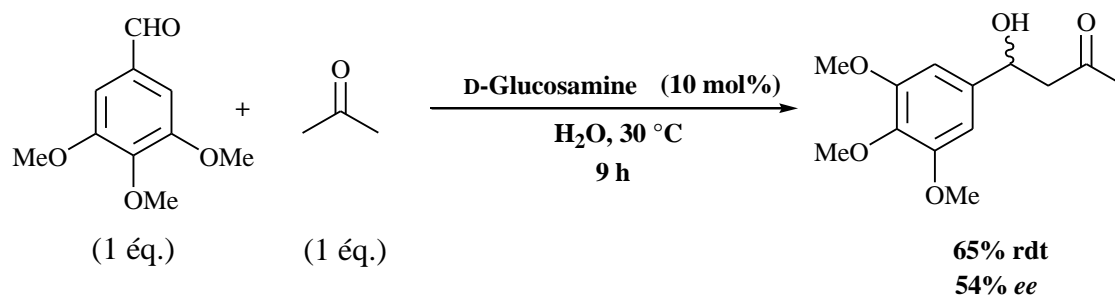
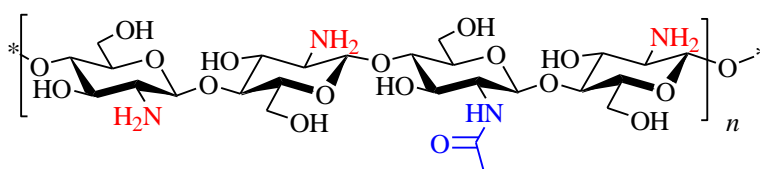


Schéma 46

Dans la majorité des cas, les produits d'aldolisation sont isolés avec de faibles excès énantiomériques (<10% ee) sauf pour le 3,4,5-triméthoxybenzaldéhyde qui a fourni des excès énantiomériques acceptables.

Introduction

Récemment, Wilhelm et coll.⁷⁴ ont examiné l'efficacité du chitosane comme organocatalyseur dans la réaction d'aldolisation. Le chitosane **59** (Schéma 47) est un polymère formé par d'unités β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-désoxy-D-glucopyranose dont les fonctions amine sont partiellement acétylées. Il résulte de la désacétylation incomplète de la chitine, second polysaccharide le plus répandu après la cellulose.



59

Schéma 47

La réaction d'aldolisation entre la cyclohexanone et le 4-nitrobenzaldéhyde, en présence de chitosane commercial (Acros Organics), a été effectuée en milieu homogène et cela en utilisant un liquide ionique comme solvant. Les liquides ioniques ont la particularité de dissoudre les biopolymères en rompant les liaisons hydrogène formées entre les chaînes de ce dernier. Parmi les liquides ioniques testés, le bromure de 1-butyl-3-méthylimidazolium ([bmim][Br]) est le solvant dans lequel les rendements et les excès énantiomériques sont les plus élevés (Schéma 48).

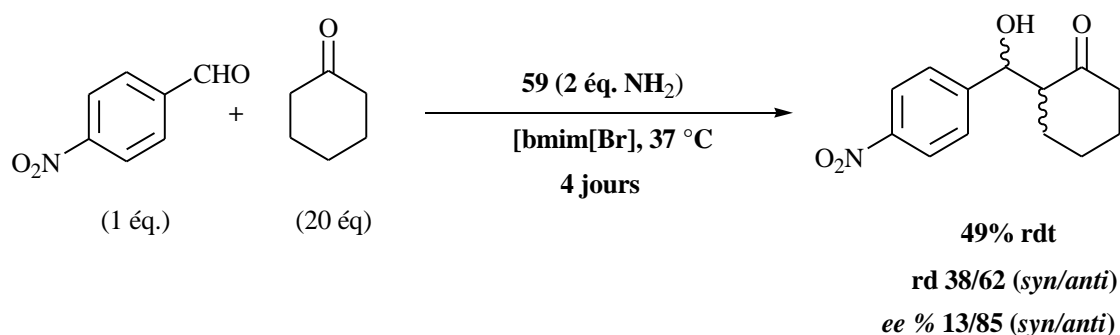


Schéma 48

Il est important de noter que même si les énantio- et diastéréosélectivités de la réaction restent modestes, le catalyseur utilisé est un mélange de polymères dont le poids moléculaire varie entre 100000 et 300000 g/mol.

Ce polymère a aussi été utilisé comme catalyseur hétérogène dans une réaction d'aldolisation en milieu aqueux.⁷⁵

⁷⁴ T. Heckel, D. D. Konieczna, R. Wilhem, *Catalysts* **2013**, 3, 914-921.

⁷⁵ C. Gioia, A. Ricci, L. Bernardi, K. Bourahla, N. Tanchoux, M. Robitzer, F. Quignard, *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 588-594.

I.E. Les autres modes d'activation de l'organocatalyse

Ce paragraphe permettra d'avoir un aperçu sur les autres modes d'activation importants utilisés en organocatalyse asymétrique. La première partie concernera les organocatalyseurs de type acide de Lewis alors que la deuxième partie se concentrera sur l'activation par liaison hydrogène.

I.E.1. L'organocatalyse par un acide de Lewis chiral

Sans aucun doute, la méthode la plus répandue en chimie organique pour réaliser des réactions asymétriques est l'utilisation des complexes chiraux des métaux de transition⁷⁶ ou même des lanthanides.⁷⁷ Dans beaucoup de cas, le métal est un acide de Lewis.⁷⁸ Cependant, l'organocatalyse offre plusieurs exemples de catalyseurs capables de jouer le rôle d'acide de Lewis dans les transformations chimiques tout en assurant une induction asymétrique. Ces organocatalyseurs sont souvent des dérivés de cations silylés,⁷⁹ des sels de phosphonium,⁸⁰ des liquides ioniques⁸¹ ou des carbocations.⁸² Seuls les organocatalyseurs de type cations phosphonium et carbocations seront illustrés dans cette partie.

I.E.1.a. Par des sels de phosphonium

L'utilisation des sels de phosphonium comme catalyseur de type acide de Lewis nécessite la formation d'une liaison hyperconjuguée entre une base de Lewis d'une part et le catalyseur d'autre part pour générer une espèce activée. L'interaction n-σ* entre une paire d'électrons non liants (n) d'une base de Lewis et l'orbitale non-liante (σ*) nécessite que l'accepteur acide de Lewis soit capable d'élargir sa sphère de coordination pour atteindre l'état d'hyperconjugaison.⁸³ De plus, cette liaison hyperconjuguée est souvent stabilisée par la présence d'un groupement électroattracteur en position apicale de la structure bipyramidale trigonale ainsi formée (Schéma 49).⁸⁴

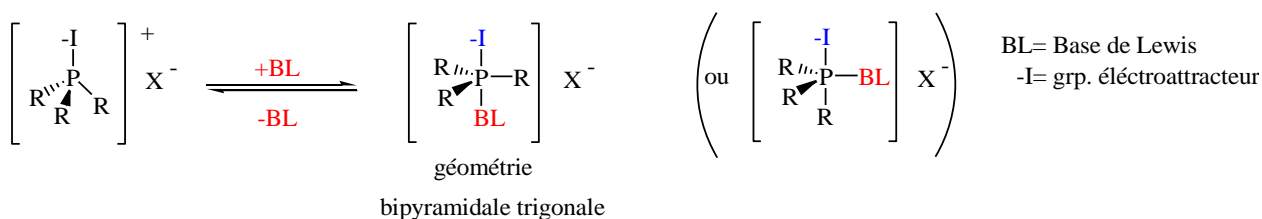


Schéma 49

⁷⁶ a) G. C. Fu, *J. Org. Chem.* **2004**, *69*, 3245-3249; b) T. Ikariya, K. Murata, R. Noyori, *Org. Biomol. Chem.* **2006**, *4*, 393-406.

⁷⁷ H. C. Aspinall, *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 1807-1850.

⁷⁸ S. E. Denmark, T. Wynn, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 6199-6200.

⁷⁹ M. Johannsen, K. A. Jørgensen, G. Helmchen, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 7637-7638.

⁸⁰ M. Terada, M. Kouchi, *Tetrahedron* **2006**, *62*, 401-409.

⁸¹ J. S. Yadav, B. V. S. Reddy, G. Baishya, *J. Org. Chem.* **2003**, *68*, 7098-7100.

⁸² A. Brunner, S. Taudien, O. Riant, H. B. Kagan, *Chirality* **1997**, *9*, 478-486.

⁸³ S. E. Denmark, G. L. Beutner, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 1560-1638.

⁸⁴ T. Werner, *Adv. Synth. Catal.* **2009**, *351*, 1469-1481.

Introduction

Une réaction de cycloaddition [2+2] entre l'acétal de cétène **61** et l'imine activée **60** en présence de 5 mol% du sel de phosphonium chiral **62**, développée par Lectka et coll., conduit à la formation des β -lactames disubstitués **63** de configuration *trans* très majoritairement.⁸⁵

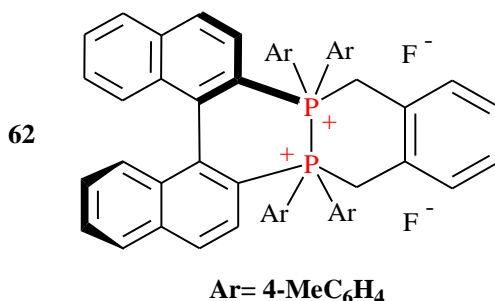
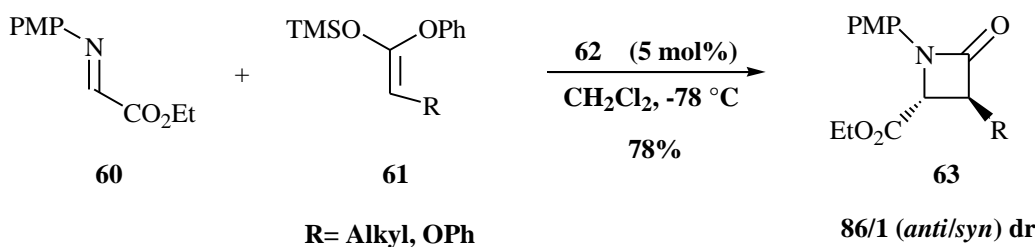


Schéma 50

Les auteurs ont proposé un mécanisme où **62** joue le rôle d'un précatalyseur multifonctionnel. Dans un premier temps, l'ion fluorure permet la déprotection de l'éther silylé conduisant à l'ion énolate, qui peut se complexer aux cations phosphoniums assurant ainsi une bonne diastéréosélectivité. Le cation phosphonium organise un état de transition qui donne lieu au produit cinétiquement favorable, le diastéréoisomère *trans*. Le vrai catalyseur de la réaction est celui formé entre le cation phosphonium et l'anion phénoxyde. Les rendements comme la diastéréosélectivité résultent du fait que le cation du sel phosphonium **62** joue le rôle d'un acide de Lewis dans cette réaction (Schéma 51).

⁸⁵ C. J. Abraham, D. H. Paull, C. Dogo-Isonagie, T. Lectka, *Synlett* **2009**, 1651-1654.

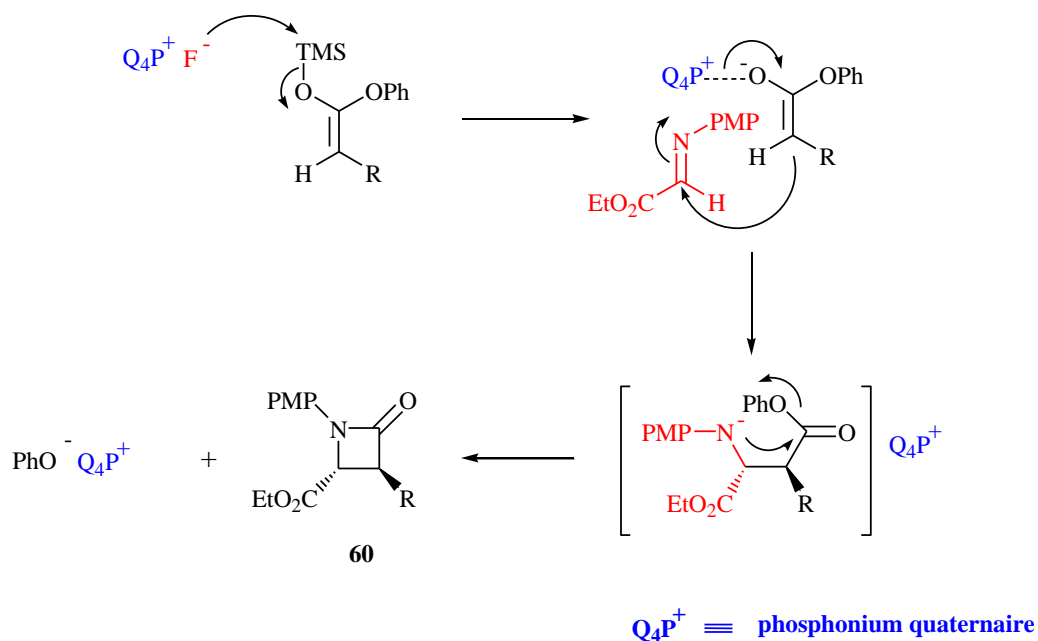


Schéma 51

La réaction d'alpha-amination énantiosélective de benzofuranones **64** substituées sur la position 3 par le dibenzyl diazène-1,2-dicarboxylate **65** a été réalisée pour la première fois par Ma et coll.⁸⁶ en utilisant un sel de spiro-phosphonium quaternaire **66**.

⁸⁶ C.-L. Zhu, F.-G. Zhang, W. Meng, J. Nie, D. Cahard, J.-A. Ma, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 5869-5872.

Introduction

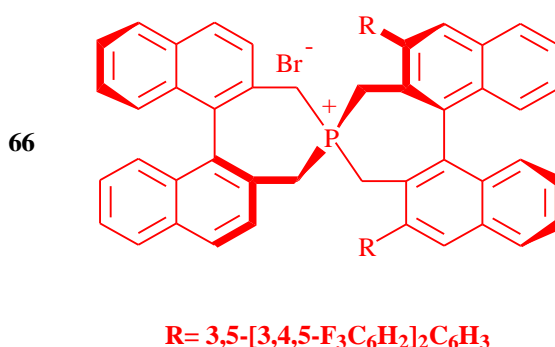
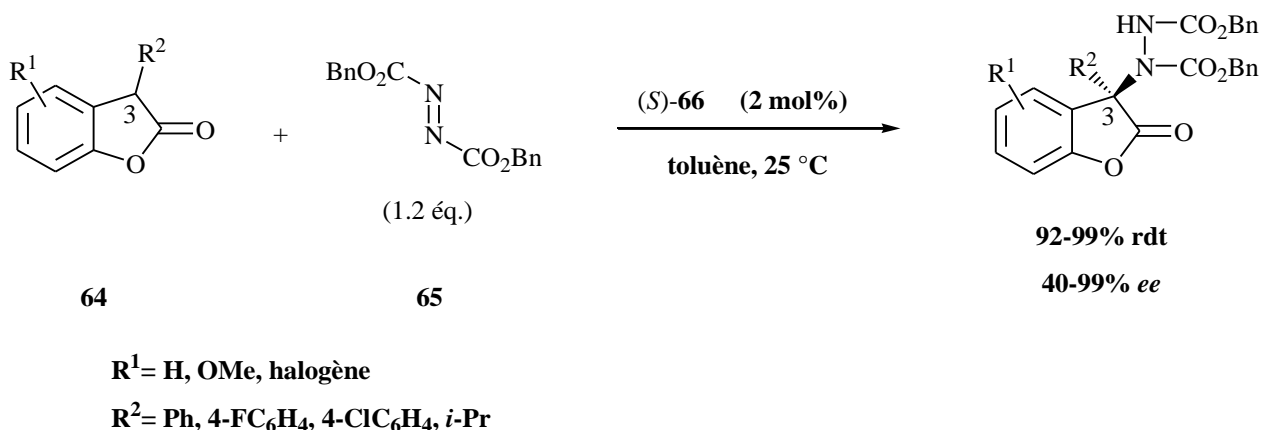


Schéma 52

L'étude mécanistique montre que la réaction procède *via* la formation de la forme énol de **64**, espèce qui est détectable par spectrométrie de masse couplée à la chromatographie en phase liquide (HPLC/MS, électrospray en ionisation positive). Cette forme énol, en équilibre avec sa forme cétonique, est stabilisée par l'interaction stabilisante de type π - π introduite par le substrat et les binaphtyls du catalyseur, résultat confirmé par calcul DFT. Le cation phosphonium de **66**, étant un acide de Lewis, par coordination au réactif **65** active ce dernier qui subit l'attaque de l'énol. L'organocatalyseur est tellement efficace que juste 2 mol% sont nécessaires pour obtenir de très bons rendements avec des excès énantiomériques allant jusqu'à 99%.

I.E.1.b. Par des carbocations chiraux

Les premiers travaux utilisant les sels de carbénium en synthèse organique ont été rapportés en 1984 pour réaliser des réactions d'aldolisation de type Mukaiyama et des réactions d'addition de Michael.⁸⁷ Ces réactions étaient catalysées par les dérivés achiraux du cation trityle **67**.

⁸⁷ O. Sereda, S. Tabassum, R. Wilhelm, "Lewis Acid Organocatalysts" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.

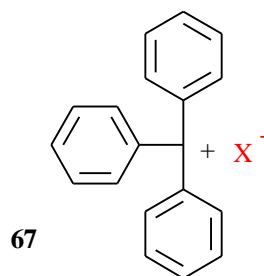


Schéma 53

Par contre, Chen et *al.*⁸⁸ ont publié la première aldolisation de type Mukaiyama énantiosélective organocatalysée par le perchlorate de triarylcarrénium chiral **70**. Cette réaction réalisée entre le benzaldéhyde **68** et l'acétal de cétène silylé **69** conduit au β-hydroxyester correspondant avec un faible rendement (22%) et des excès énantiomériques modérés (50% *ee*) (Schéma 54).

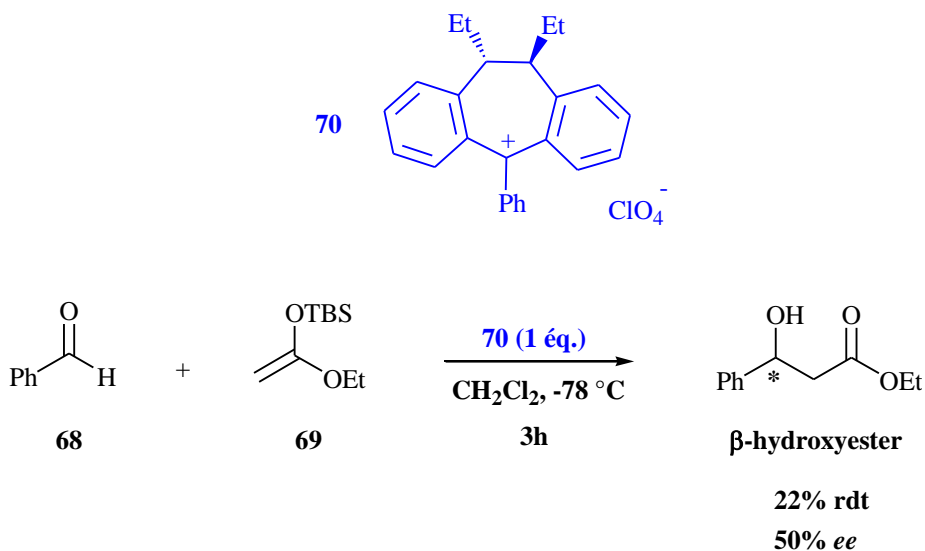


Schéma 54

L'ion carrénium joue le rôle d'un acide de Lewis qui en se complexant à l'oxygène du carbonyle du benzaldéhyde le rend plus électrophile facilitant ainsi la réaction.

I.E.2. L'organocatalyse par liaison hydrogène

Les molécules organiques chirales ayant des atomes d'hydrogène acide peuvent catalyser plusieurs transformations chimiques et leur utilisation est devenue extrêmement importante en organocatalyse énantiosélective.⁸⁹ Plusieurs groupements fonctionnels peuvent servir comme

⁸⁸ C.-T. Chen, S.-D. Chao, K.-C. Yen, C.-H. Chen, I.-C. Chou, S.-W. Hon, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 11341-11342.

⁸⁹ a) P. R. Schreiner, *Chem. Soc. Rev.* **2003**, *32*, 289-296; b) H. Klare, J. M. Neudörfl, B. Goldfuss, *Beilstein J. Org. Chem.* **2014**, *10*, 224-236; c) L. Albrecht, H. Jiang, K. A. Jørgensen, *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 358-368.

Introduction

donneur de liaisons hydrogène. Nous pouvons citer les urées⁹⁰ ou thiourées⁹¹, les guanidiniums⁹² et amidiniums⁹³. La liaison hydrogène active le substrat en diminuant la LUMO de ce dernier.⁹⁴ Nous nous attarderons seulement sur les catalyseurs chiraux dérivés de sucres utilisant les liaisons hydrogène comme mode d'activation. A notre connaissance, seules les fonctions thiourée et urée ont été utilisées comme catalyseurs.

I.E.2.a. Les catalyseurs de type thiourée

Agoston et al.⁹⁵ ont synthétisé une série d'organocatalyseurs dérivés du galactopyranose dont les positions 4 et 6 ont été fonctionnalisées. Ainsi l'hydroxyle en position 4 a été substitué par une fonction amine alors que le groupement thiourée a été introduit en position 6 du sucre. Ces catalyseurs ont été ensuite évalués dans les réactions de Michael asymétriques (Schéma 55).

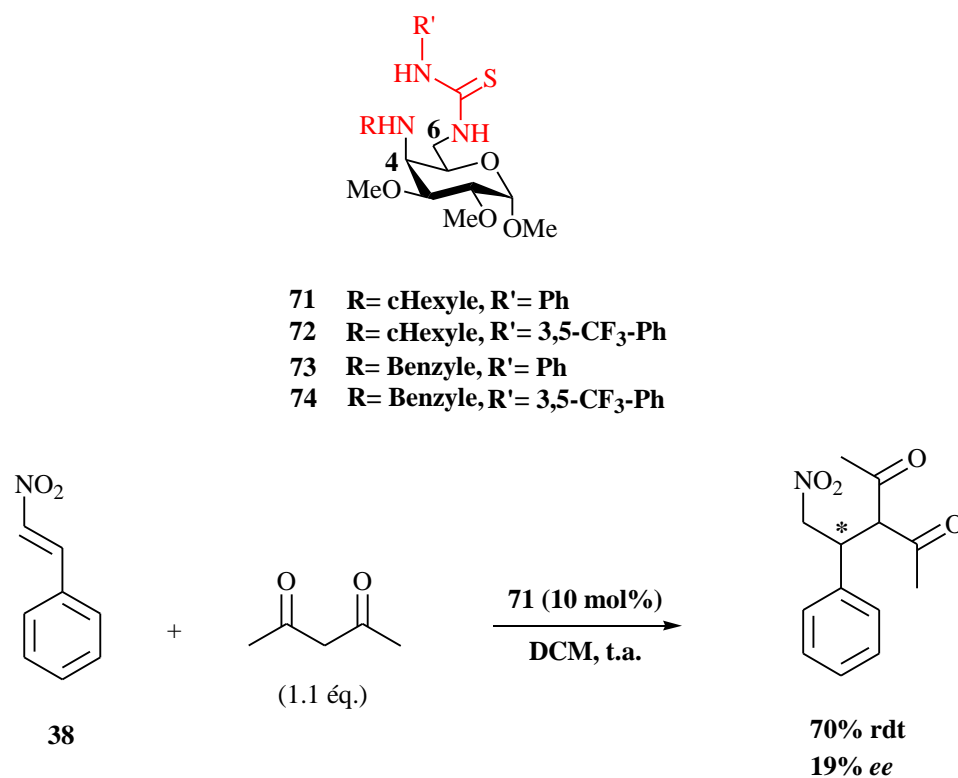


Schéma 55

Parmi les différents catalyseurs testés, le catalyseur **71** s'est avéré être le plus efficace en terme de rendement et d'énantiosélectivité. Le mécanisme proposé par les auteurs repose sur l'établissement de liaisons hydrogène entre les substrats et les fonctions thiourée et amine.

⁹⁰ P. Vachal, E. N. Jacobsen, *Org. Lett.* **2000**, *2*, 867-870.

⁹¹ Z. Zhang, P. R. Schreiner, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 1187-1198.

⁹² E. J. Corey, M. J. Grogan, *Org. Lett.* **1999**, *1*, 157-160.

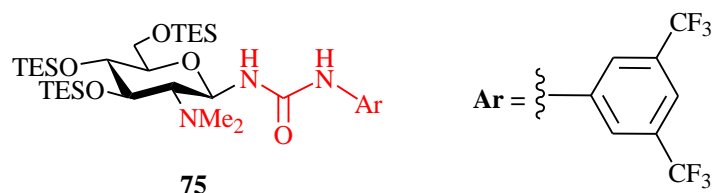
⁹³ T. Schuster, M. Bauch, G. Dürner, M. W. Göbel, *Org. Lett.* **2000**, *2*, 179-181.

⁹⁴ M. De Rosa, L. Citro, A. Soriente, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 8507-8510.

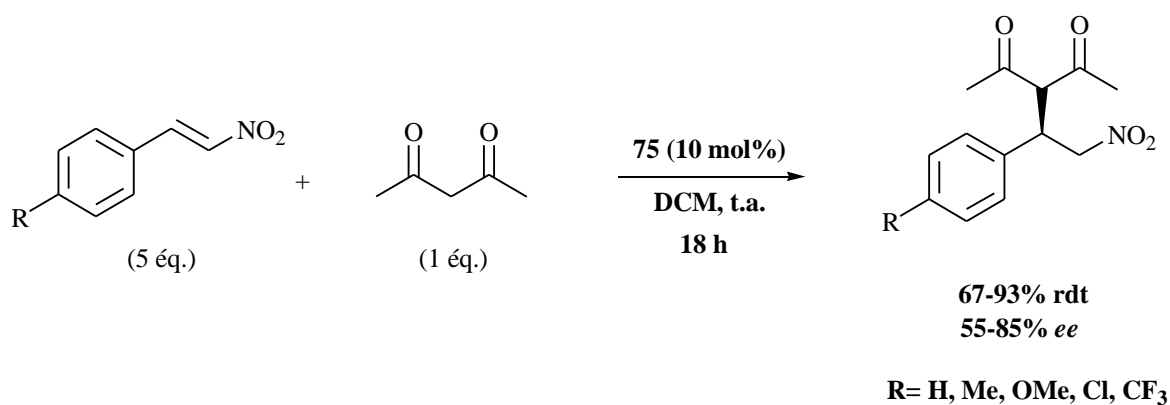
⁹⁵ K. Ágoston, P. Fügedi, *Carbohydr. Res.* **2014**, *389*, 50-56.

I.E.2.b. Les catalyseurs de type urée

Puglisi et *al.*⁹⁶ ont, quant à eux, utilisé des catalyseurs dérivés de la *N,N*-diméthylglucosamine possédant une fonction urée en position anomérique (Schéma 56).



Réaction de Michael:



Réaction de Mannich:

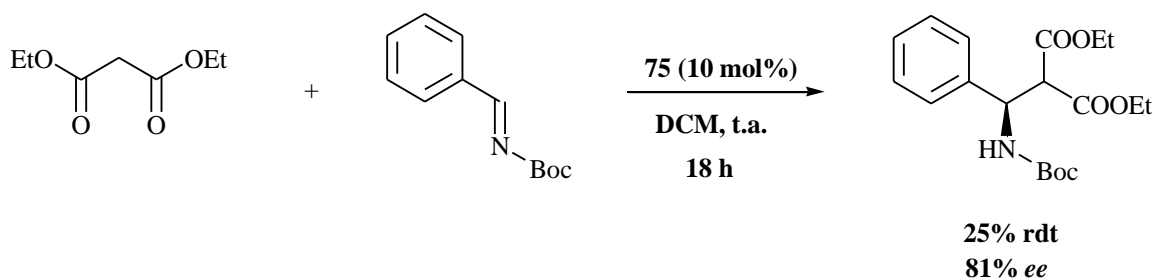


Schéma 56

⁹⁶ A. Puglisi, M. Benaglia, L. Raimondi, L. Lay, L. Poletti, *Org. Biomol. Chem.* **2011**, 9, 3295-3302.

Introduction

Ils ont pu ainsi montrer que 10 mol% du dérivé **75** suffisaient pour catalyser des réactions de Michael et de Mannich asymétriques. Le mécanisme d'activation de ces réactions a été expliqué sur la réaction de Michael comme modèle. L'organocatalyseur **75**, de par sa fonction urée, permet d'activer le β -nitrostyrène par liaisons hydrogène. Alors que la forme énol de la dicétone serait stabilisée par une troisième liaison hydrogène impliquant l'amine tertiaire. (Schéma 57).

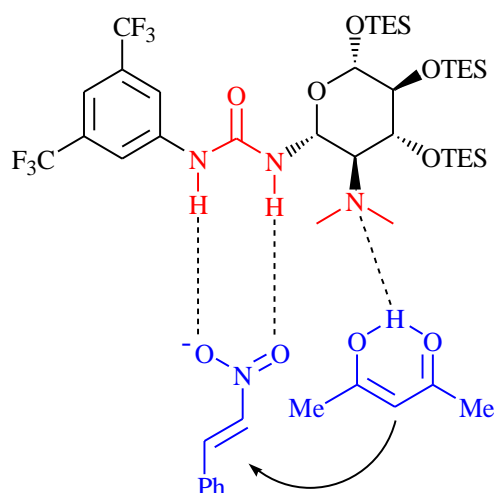


Schéma 57

En conclusion, la proline et ses dérivés, de part leurs réactivités et leurs sélectivités, dominent l'organocatalyse aujourd'hui. Par contre, l'organocatalyse mettant en jeu des entités saccharidiques comme catalyseurs reste encore relativement rare. L'objectif principal de cette thèse a été d'accéder à des organocatalyseurs de taille bien définie (oligomères) issus de la biomasse, et plus précisément la chitine. Afin de fonctionnaliser rapidement les oligomères issus de la dégradation de la chitine, nous avons développé une méthodologie permettant de fonctionnaliser la position anomérique de ces oligomères par activation micro-ondes, travail qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Ce second chapitre sera consacré aux réactions de glycosylation que nous avons mises au point sur des dérivés peracétylés issus de la dépolymérisation contrôlée de la chitine (monomère et dimère) par activation micro-ondes. Nous présenterons donc une introduction sur la biomasse (d'où dérive la chitine) et sur les différentes méthodes utilisées permettant d'obtenir des oligomères de taille définie. Nous finirons ce chapitre par l'exposé de nos résultats concernant l'hydrolyse partielle de la chitine et les réactions de glycosylations que nous avons réalisées sous activation micro-ondes.

I. La biomasse

De nos jours, l'industrie chimique mondiale est presque exclusivement basée sur des ressources non renouvelables, à savoir les combustibles fossiles (e.g. pétrole, gaz naturel, etc...), qui fournissent également 90% de tous nos besoins en énergie.⁹⁷ L'épuisement de ces ressources fossiles et les effets néfastes sur l'environnement mondial et le climat sont une préoccupation académique, économique et politique dans le monde entier.⁹⁸ Une étude récente montre que la consommation d'énergie mondiale en 2010 est le double de celle en 1971, comme pour la production de CO₂.⁹⁹ L'émission mondiale intensive de CO₂ (~10 milliards de tonnes de carbone), conduit à un cycle mondial de CO₂ hors-équilibre. Seulement 50% du carbone émis dans l'atmosphère est réabsorbé par les «puits» naturels,¹⁰⁰ tels que les forêts et les océans.¹⁰¹ Alors que les réserves de combustibles fossiles et les produits pétrochimiques associés pourraient bientôt être limités, des solutions alternatives sont recherchées. Une solution est de développer une série de nouveaux processus chimiques basés sur les matières premières renouvelables, la biomasse et les produits chimiques généralement issus de la biomasse. Par définition, la biomasse est toute forme de carbone non fossile, contenant de l'énergie et qui comprend toute la végétation présente sur la terre et dans l'eau ainsi que d'autres matériaux tels que les déchets municipaux solides, résidus forestiers et agricoles, et les déchets industriels. En d'autres termes, la biomasse est l'ensemble des matières organiques non fossiles qui ont une teneur en énergie chimique intrinsèque.¹⁰² La biomasse lignocellulosique (bois, herbe et les déchets agricoles) est la source la plus abondante et la moins chère, et donc a été identifiée comme matière première, économiquement viable, pour la production de biocarburants renouvelables *via* les technologies

⁹⁷ A. Szabolcs, M. Molnár, G. Dibó, L. T. Mika, *Green Chem.* **2013**, *15*, 439-445.

⁹⁸ C.-H. Zhou, X. Xia, C.-X. Lin, D.-S. Tong, J. Beltramini, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 5588-5617.

⁹⁹ I. E. Agency, OECD/IEA, **2012** edn, **2012**.

¹⁰⁰ T. W. R. Powell, T. M. Lenton, *Energy Environ. Sci.* **2012**, *5*, 8116-8133.

¹⁰¹ Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes, *Science* **2011**, *333*, 988-993.

¹⁰² D. L. Klass, *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*, Elsevier, Amsterdam, **1998**.

appropriées.¹⁰³ Le composant majeur de cette biomasse est la cellulose, un polysaccharide d'unités glucose liées entre elles par des liaisons β -1,4-glycosidiques.¹⁰⁴

Le second polysaccharide le plus abondant est la chitine.

I.A. La chitine

La chitine, un mot grec signifiant cote de mailles,¹⁰⁵ a été découverte par Henri Braconnot en 1811 dans les champignons.¹⁰⁶ On retrouve ce biopolymère notamment dans la carapace des crustacés (e.g. crevettes, crabes, homards), des insectes et la paroi cellulaire des champignons.¹⁰⁷

I.A.1. Structure et isolement

La chitine est un polymère linéaire formé par l'assemblage d'unités de *N*-acétylglucosamine reliées entre elles par une liaison β -1,4 (Schéma 58).¹⁰⁸

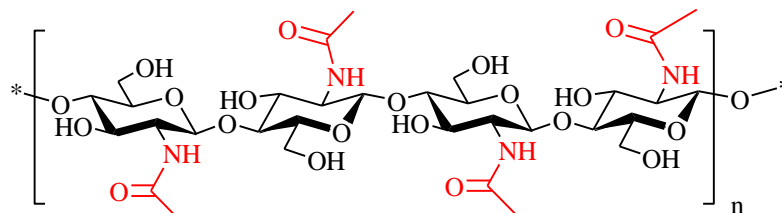


Schéma 58

La chitine est caractérisée par un degré d'acétylation (DA) des fonctions amine généralement de 90%.¹⁰⁹ Si ce degré d'acétylation est inférieur à 35%, le polymère est appelé chitosane.

Les carapaces des crustacés représentent une source importante de chitine. La méthode la plus courante pour isoler chimiquement ce polymère implique un certain nombre d'étapes: le lavage, le broyage et le tamisage des coquilles brutes sont suivis d'une déminéralisation par un

¹⁰³ C. Liu, H. Wang, A. M. Karim, J. Sun, Y. Wang, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, DOI: 10.1039/C3CS60414D.

¹⁰⁴ Y. Nishiyama, J. Sugiyama, H. Chanzy, P. Langan, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 14300-14306.

¹⁰⁵ F. Shahidi, J. K. V. Arachchi, Y.-J. Jeon, *Trends Food Sci. Technol.* **1999**, *10*, 37-51.

¹⁰⁶ H. Braconnot, *Ann. Chim. Phys.*, **1811**, *79*, 265-304.

¹⁰⁷ C. Wang, A. R. Esker, *Carbohydr. Polym.* **2014**, *102*, 151-158.

¹⁰⁸ a) X. Chen, S. L. Chew, F. M. Kerton, N. Yan, *Green Chem.* **2014**, *16*, 2204-2212; b) M. Rinaudo, *Prog. Polym. Sci.* **2006**, *31*, 603-632.

¹⁰⁹ a) Y. Dong, C. Xu, J. Wang, Y. Wu, M. Wang, Y. Ruan, *J. Appl. Polym. Sci.* **2002**, *83*, 1204-1208; b) S. P. Campana-Filho, D. d. Britto, E. Curti, F. R. Abreu, M. B. Cardoso, M. V. Battisti, P. C. Sim, R. C. Goy, R. Signini, R. L. Lavall, *Quim. Nova* **2007**, *30*, 644-650.

traitement acide pour éliminer les minéraux tels le carbonate de calcium et d'une étape de déprotéinisation par traitement basique (NaOH ou KOH aqueux).¹¹⁰

I.A.2. Propriétés structurales

Dans la nature, la chitine est principalement trouvée comme matériau cristallin fibrillaire. Sur la base de la spectroscopie infrarouge, ainsi que d'autres données expérimentales, on distingue essentiellement deux allomorphes (ou polymorphes) de chitine, à savoir l' α -chitine, l'allomorphe le plus abondant, et la β -chitine plus rare.¹¹¹ Une étude révélait la présence d'une troisième forme cristallographique, le polymorphe γ ¹¹², mais des investigations plus récentes montrent que ce dernier polymorphe n'est qu'une variante de la forme α .¹¹³

La chitine est un polymère dont le poids moléculaire peut atteindre 10^6 Dalton.¹¹⁴ Elle est insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques en raison des fortes liaisons hydrogène présentes entre les chaînes de polymères.¹¹⁵

I.B. Le chitosane

Le chitosane est l'un des plus importants dérivés de la chitine. Il se différencie de la chitine par son degré d'acétylation, typiquement de moins de 35% (Schéma 59). Il est, par conséquent, un copolymère composé de glucosamine et de *N*-acétylglucosamine. Les propriétés physiques du chitosane dépendent d'un certain nombre de paramètres tels que le poids moléculaire (à partir d'environ 10 000 à 1 million de Dalton), son degré de désacétylation (de l'ordre de 50-95%), de la séquence de ses fonctions amine-acétamide et de la pureté du produit.¹¹⁶

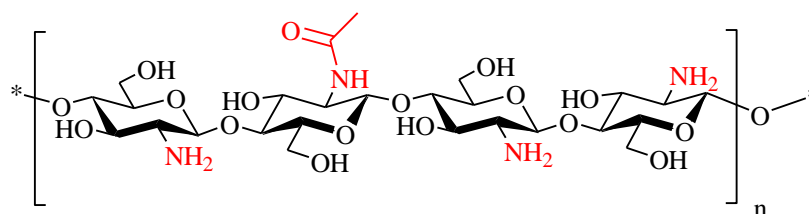


Schéma 59

Alors que la chitine est très peu soluble, le chitosane, de par la présence de ses fonctions amines primaires, peut être solubilisé dans des solutions aqueuses dont le pH est acide. En effet, dans ces conditions, la protonation des amines fait du chitosane un polyelectrolyte cationique soluble dans l'eau. Ainsi, des acides organiques tels que les acides acétique, formique, lactique peuvent

¹¹⁰ J. Kumirska, M. Czerwicka, Z. Kaczyński, A. Bychowska, K. Brzozowski, J. Thöming, P. Stepnowski, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 1567-1636.

¹¹¹ Y. Saito, J. L. Putaux, T. Okano, F. Gaill, H. Chanzy, *Macromolecules* **1997**, *30*, 3867-3873.

¹¹² K. M. Rudall, *J. Polym. Sci., Part C: Polym. Symp.* **1969**, *28*, 83-102.

¹¹³ E. Atkins, *J. Biosci.* **1985**, *8*, 375-387.

¹¹⁴ R. N. Tharanathan, F. S. Kittur, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2003**, *43*, 61-87.

¹¹⁵ R. Flores, S. Barrera-Rodríguez, K. Shirai, C. Durán-de-Bazúa, *J. Appl. Polym. Sci.* **2007**, *104*, 3909-3916.

¹¹⁶ C. K. S. Pillai, W. Paul, C. P. Sharma, *Prog. Polym. Sci.* **2009**, *34*, 641-678.

dissoudre le chitosane.¹¹⁷ Le meilleur solvant pour solubiliser le chitosane s'est révélé être l'acide formique en milieu aqueux à des concentrations variant de 0,2 à 100%.¹¹⁸ D'autre part, lorsque le pH augmente au-dessus de 6, les fonctions amines se retrouvent sous leur forme NH₂ ce qui rend le polymère insoluble.

Le chitosane, et ses dérivés, possèdent des propriétés intéressantes telles que des activités antivirales, antifongiques et antibactériennes.¹¹⁹ De part la présence de leurs fonctions amines primaires, de nombreuses réactions chimiques peuvent être appliquées.¹²⁰ De plus, ils peuvent se complexer aux métaux et décontaminer ainsi certains milieux.¹²¹ Mais, à nos yeux, le chitosane possède un autre avantage, celui de pouvoir initier des réactions d'organocatalyse.

Deux grandes méthodes sont généralement utilisées pour la préparation du chitosane à partir de la chitine: une méthode chimique et une méthode enzymatique.

I.B.1. Méthode d'obtention du chitosane par voie chimique

Le chitosane peut être obtenu, à partir de la chitine, par une réaction de saponification.¹²² Il s'agit d'effectuer un traitement alcalin dans des conditions drastiques : les hydroxydes de sodium ou de potassium sont utilisés à une concentration de 30 à 50% en masse/volume à haute température (100 °C). Dans ces conditions, les dérivés du chitosane ont généralement un degré d'acétylation inférieur à 30%.

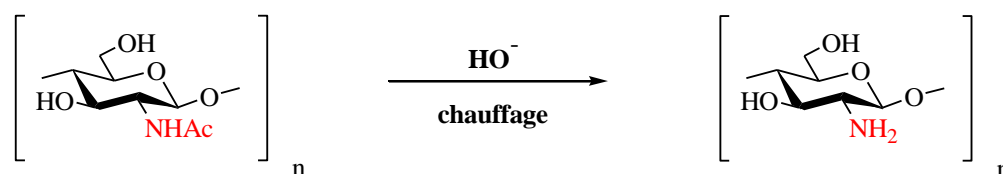


Schéma 60

Cette désacétylation de la chitine peut être effectuée soit en milieu hétérogène soit en milieu homogène. En milieu hétérogène, traitement utilisé en industrie, les réactions de déprotection des amines se font préférentiellement dans les régions amorphes du polymère pour donner des copolymères de type N-acétylglucosamine-glucosamine. Le traitement en milieu homogène est réalisée sur de la chitine "pré-gonflée" afin d'accroître la surface de contact entre la solution alcaline et le polymère. Dans ces conditions, la réaction de déprotection est aléatoire

¹¹⁷ a) M. Rinaudo, G. Pavlov, J. Desbrières, *Polymer* **1999**, *40*, 7029-7032; b) K. M. Kim, J. H. Son, S.-K. Kim, C. L. Weller, M. A. Hanna, *J. Food Sci.* **2006**, *71*, E119-E124.

¹¹⁸ C. Kienzle-Sterzer, D. Rodriguez-Sanchez, C. Rha, *J. Appl. Polym. Sci.* **1982**, *27*, 4467-4470.

¹¹⁹ a) M. M. Issa, M. Köping-Höggård, P. Artursson, *Drug Discov. Today Techn.* **2005**, *2*, 1-6; b) A. El Hadrami, L. R. Adam, I. El Hadrami, F. Daayf, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 968-987.

¹²⁰ J. Z. Knaul, S. M. Hudson, K. A. M. Creber, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* **1999**, *37*, 1079-1094.

¹²¹ E. Onsosen, O. Skaugrud, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1990**, *49*, 395-404.

¹²² M. L. Tsaih, R. H. Chen, *J. Appl. Polym.* **2003**, *88*, 2917-2923.

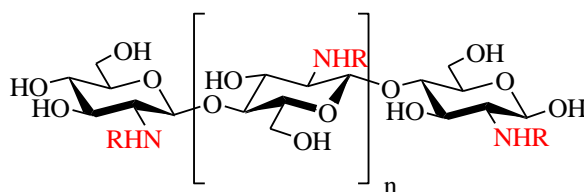
contrairement aux conditions hétérogènes. Cependant, dans les deux cas, la réaction de désacétylation nécessite l'utilisation de solutions alcalines concentrées et de longs temps de traitement qui peuvent varier de 1 à près de 80 heures.¹²³

I.B.2. Méthode d'obtention du chitosane par voie enzymatique

La désacétylation de la chitine peut être également effectuée par voie enzymatique.¹²⁴ Ce procédé enzymatique donne du chitosane avec un faible degré de *N*-acétylation et de faible degré de polymérisation.

II. Les chitooligosaccharides (COS)

Le chitosane avec des degrés de polymérisation (DP) inférieur à 20 et un poids moléculaire moyen inférieur à 3900 Da sont appelés des oligomères de chitosane, chitooligomères ou chitooligosaccharides (COS) (Schéma 61).¹²⁵



R= H ou Ac, n= 0 à 8

Schéma 61

Ces structures possèdent de nombreuses activités biologiques intéressantes aussi bien dans le monde animal que végétal.¹²⁶ Ils sont notamment des précurseurs avancés de facteurs de nodulation ou de mycorhization, composés très utiles dans le domaine de l'agriculture.¹²⁷ De part ses activités, de nombreuses méthodes de synthèse sont apparues dans la littérature.¹²⁸ Parmi

¹²³ C. K. S. Pillai, W. Paul, C. P. Sharma, "Chitosan: manufacture, properties and uses" in Chitosan: manufacture, properties, and usage- Biotechnology in Agriculture, Industry and Medicine, Samuel P. Davis, Eds., Nova Science Publishers, inc, New york, **2011**.

¹²⁴ a) T. K. Sini, S. Santhosh, P. T. Mathew, *Carbohydr. Res.* **2007**, 342, 2423-2429; b) I. Tsigos, A. Martinou, D. Kafetzopoulos, V. Bouriotis, *Trends Biotechnol.* **2000**, 18, 305-312.

¹²⁵ a) G. Lodhi, Y.-S. Kim, J.-W. Hwang, S.-K. Kim, Y.-J. Jeon, J.-Y. Je, C.-B. Ahn, S.-H. Moon, B.-T. Jeon, P.-J. Park, *BioMed. Res. Int.* **2014**, article ID 654913.

¹²⁶ S.-K. Kim, N. Rajapakse, *Carbohydr. Polym.* **2005**, 62, 357-368.

¹²⁷ a) P. Lerouge, P. Roche, C. Faucher, F. Maillet, G. Truchet, J.-C. Promé, J. Dénarié *Nature*, **1990**, 344, 781; b) G. Truchet, P. Roche, P. Lerouge, J. Vasse, S. Camut, F. de Billy, J.-C. Promé, J. Dénarié *Nature*, **1991**, 351, 670. Pour des revues, voir: c) J. Dénarié, F. Debelle, J.-C. Promé, *Annu. Rev. Biochem.* **1996**, 65, 503; d) S. R. Long, *Plant Cell* **1996**, 8, 1885; H. P. Spaink, *Annu. Rev. Microbiol.* **1998**, 54, 257; e) J.-M. Beau, *Chimia* **2011**, 65, 45-48.

¹²⁸ Pour une revue récente, voir: Y. Yang, B. Yu, *Tetrahedron* **2014**, 70, 1023-1046.

celles-ci les dépolymérisations chimique et enzymatique de la chitine ou du chitosane sont les plus souvent utilisées.¹²⁹

II.A. Dégradation chimique

La plus grande méthode utilisée pour obtenir les chitooligosaccharides est une hydrolyse acide partielle de la chitine ou du chitosane, partie qui sera détaillée ci-dessous. Mais nous mentionnerons, ici, que des méthodes d'oxydoréduction, initiées par le peroxyde d'hydrogène¹³⁰ ou le persulfate de potassium,¹³¹ permettent également la dépolymérisation de la chitine conduisant à des chitooligosaccharides de poids moléculaires assez élevés variant de 2 à 40 KDa.¹³²

II.A.1. via une réaction d'hydrolyse

L'hydrolyse de la chitine ou chitosane est effectuée par l'utilisation d'acide comme l'acide chlorhydrique,¹³³ l'acide nitreux,¹³⁴ l'acide phosphorique,¹³⁵ ou l'acide fluorhydrique.¹³⁶

La première hydrolyse en milieu acide à partir du chitosane a été rapportée par Horowitz et *al.* en 1957.¹³⁷ En utilisant de l'acide chlorhydrique (C= 4N) à une température de 53 °C, les auteurs ont réussi à obtenir plusieurs fractions d'oligomères ayant des degrés de polymérisation variant de 1 à 6 (DP1 à DP6). Ces oligomères ont été isolés sous forme de chlorhydrates. Ils ont observé qu'au bout de 72 h, une très grande partie du chitosane s'était dépolymérisé pour donner presque exclusivement le monomère de D-glucosamine. Par contre, un temps de 48 h s'est avéré être optimal pour l'obtention de COS de faible poids moléculaire.

D'autre part, Falk et *al.*¹³⁸ ont découvert que l'hydrolyse de la chitine dans l'acide chlorhydrique concentré (C= 10,2M) s'effectue en deux étapes distinctes, à savoir, la dépolymérisation du polysaccharide en unités polymériques plus petites allant jusqu'à la plus petite structure, la *N*-acétylglucosamine et enfin, la conversion de la *N*-acétylglucosamine en D-glucosamine. L'hydrolyse catalysée par un acide de la chitine implique donc deux réactions principales: l'hydrolyse de la liaison glycosidique (conduisant à la dépolymérisation) et ensuite

¹²⁹ a) Y. J. Jeon, F. Shahidi, S-K. Kim, *Food Rev. Int.* **2000**, *16*, 159-176; b) B. B. Aam, E. B. Heggset, A. L. Norberg, M. Sørli, K. M. Vårum, V. G. H. Eijsink, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 1482-1517.

¹³⁰ F. Tian, Y. Liu, K. Hu, B. Zhao, *Journal of Materials Science* **2003**, *38*, 4709-4712.

¹³¹ K. V. Harish Prashanth, S. M. Dharmesh, K. S. Jagannatha Rao, R. N. Tharanathan, *Carbohydr. Res.* **2007**, *342*, 190-195.

¹³² V. K. Mourya, N. N. Inamdar, Y. M. Choudhari, *Polym. Sci. Ser. A* **2011**, *53*, 583-612.

¹³³ A. Domard, N. Cartier, *Int. J. Biol. Macromol.* **1989**, *11*, 297-302.

¹³⁴ E. Furusaki, Y. Ueno, N. Sakairi, N. Nishi, S. Tokura, *Carbohydr. Polym.* **1996**, *29*, 29-34.

¹³⁵ Z. Jia, D. Shen, *Carbohydr. Polym.* **2002**, *49*, 393-396.

¹³⁶ J. Defaye, A. Gadelle, C. Pedersen, *Carbohydr. Res.* **1994**, *261*, 267-277.

¹³⁷ S. T. Horowitz, S. Roseman, H. J. Blumenthal, *J. Am. Chem. Soc.* **1957**, *79*, 5046-5049.

¹³⁸ M. Falk, D. G. Smith, J. McLachlan, A. G. McInnes, *Can. J. Chem.* **1966**, *44*, 2269-2281.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

l'hydrolyse de la fonction acétamide (désacétylation). Le mécanisme le plus communément admis pour la réaction de dépolymérisation est illustré ci-dessous.¹³⁹

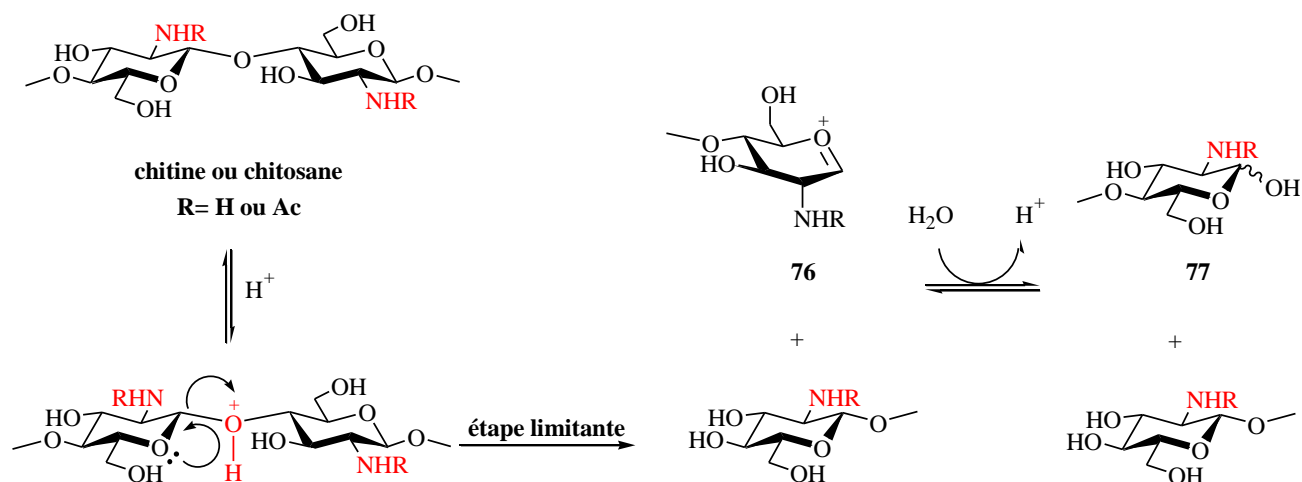


Schéma 62

Le mécanisme implique la protonation de l'atome d'oxygène exocyclique pour transiter par la formation de l'ion oxycarbénium **76**. L'attaque nucléophile d'une molécule d'eau en position anomérique conduit à la formation du sucre réducteur **77**.

Le tableau 7 résume les principaux résultats obtenus par hydrolyse acide du chitosane.¹³²

¹³⁹ a) A. Einbu, H. Grasdalen, K. M. Vårum, *Carbohydr. Res.* **2007**, 342, 1055-1062; b) K. M. Vårum, M. H. Ottøy, O. Smidsrød, *Carbohydr. Polym.* **2001**, 46, 89-98.

Dépolymérisé par	Conditions	DP majeur ou MM ^a
	Hydrolyse acide	
HCl	12 M, 53 °C, 48 h	2-5
	12 M, 53 °C, 13 h	2-6
	12 M, 80 °C, 2 h	5-7
	12 M, 100 °C, 8 h	7.5-64 kDa
	12 M, 72 °C, < 3 h	2-7
	4 M, 100 °C, 15 h	24 kDa
	0.6 M, 20 jours	12 kDa
HNO₂ (NaNO ₂ + CH ₃ CO ₂ H)	0.4 mM, t.a, 15 h	9-17
	70 mM, 0-4 °C, 9 h	7.3 kDa
H₃PO₄	60%, 70 °C, 4 h	8
	85%, t.a, 1 mois	7-17
	85%, 60 °C, 1-15 h	19-20 kDa
HF	100%, 20 °C, 19 h	2-10

^a MM= Masse Moléculaire, DP= Degré de Polymérisation

Tableau 7

Comme le tableau le montre, la température de réaction a une grande influence sur le degré de dépolymérisation. Cependant, en présence d'acide chlorhydrique concentré et ce à des températures n'excédant pas les 80 °C, seuls des oligomères de faibles degrés de polymérisation (variant entre 2 et 7) sont obtenus. Cependant, il est important de mentionner que l'utilisation de l'acide sulfurique (H₂SO₄) à la place d'HCl conduit à une dépolymérisation plus importante et que les degrés de polymérisation des chitooligosaccharides dépendent fortement de la température de réaction.¹⁴⁰

Les méthodes présentées ci-dessus donnent accès à des chitooligosaccharides déprotégés. Ces hydrolyses présentent toutefois deux principaux inconvénients : les faibles rendements en

¹⁴⁰ a) K. Nagasawa, Y. Tohira, Y. Inoue, N. Tanoura, *Carbohydr. Res.* **1971**, *18*, 95-102; b) K. Nagasawa, N. Tanoura, *Chem. Pharm. Bull.* **1972**, *20*, 157-162.

oligomères et la difficulté de purification de ces oligomères, qui s'avèrent difficiles car déprotégés. Une alternative repose sur l'acétolyse qui conduit aux oligomères protégés, plus facilement isolables et manipulables que leurs analogues non acétylés.

II.A.2. via une réaction d'acétolyse

La réaction d'acétolyse de la chitine n'est pas une réaction triviale. Même si les réactifs utilisés sont identiques, à savoir un mélange acide sulfurique-anhydride acétique, les rendements et la distribution des fragments dépendent fortement de la forme de la chitine utilisée et des conditions opératoires (température et temps de réaction). Malgré cela, cette réaction est bien documentée dans la littérature car elle permet d'obtenir des chitooligosaccharides en une seule étape.¹⁴¹ Dans la majorité des cas, seuls les rendements en chitobiose peracétylé (DP2) sont indiqués et n'excèdent pas les 9%. Les seules études relatant l'isolement des oligomères de taille différente ont été rapportées par Delmotte et al.¹⁴² puis par Inaba et al.¹⁴³ Le procédé utilisé par Inaba consiste à faire réagir la chitine avec un mélange Ac₂O/H₂SO₄ (7.7/1 v/v) pendant une nuit à température ambiante. Le mélange est ensuite chauffé à 55 °C pour 3 heures. La séparation des différents chitooligosaccharides peracétylés est réalisée sur une colonne Sephadex® LH-20. A partir de 100g de chitine, 6.1 g (3.6%) de chitobiose peracétylé **78**, 5.4g (3.4%) de chitotriose peracétylé **79** et 3.7g (2.4%) de chitotétraose peracétylé **80** ont été isolés (Schéma 63).

¹⁴¹ a) M. Bergmann, L. Zervas, E. Silberkweit, *Ber.* **1931**, *64*, 2436-2440; b) S. A. Barker, A. B. Foster, M. Stacey, J. M. Webber, *J. Chem. Soc.* **1958**, 2218-2227; c) T. Osawa, *Carbohydr. Res.* **1966**, *1*, 435-443; d) M. Spinola, R. W. Jeanloz, *J. Biol. Chem.* **1970**, *245*, 4158-4162; e) M. Schaban, R. W. Jeanloz, *Carbohydr. Res.* **1971**, *19*, 311-318; f) R. Otson, C. Reyes-Zamora, J. Y. Tang, C. S. Tsai, *Can. J. Biochem.* **1973**, *51*, 1-6; g) S.-I. Nishimura, H. Kuzuhara, Y. Takiguchi, K. Shimahara, *Carbohydr. Res.* **1989**, *194*, 223-231; h) R. Chang, A. R. Yeager, N. S. Finney, *Org. Biomol. Chem.* **2003**, *1*, 39-41; i) M. Mathiselvam, A. Srivastava, B. Varghese, S. Pérez, *Carbohydr. Res.* **2013**, *380*, 37-44.

¹⁴² F. M. Delmotte, M. L. P. Monsigny, *Carbohydr. Res.* **1974**, *36*, 219-226.

¹⁴³ T. Inaba, T. Ohgushi, Y. Iga, E. Hasegawa, *Chem. Pharm. Bull.* **1984**, *32*, 1597-1603.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

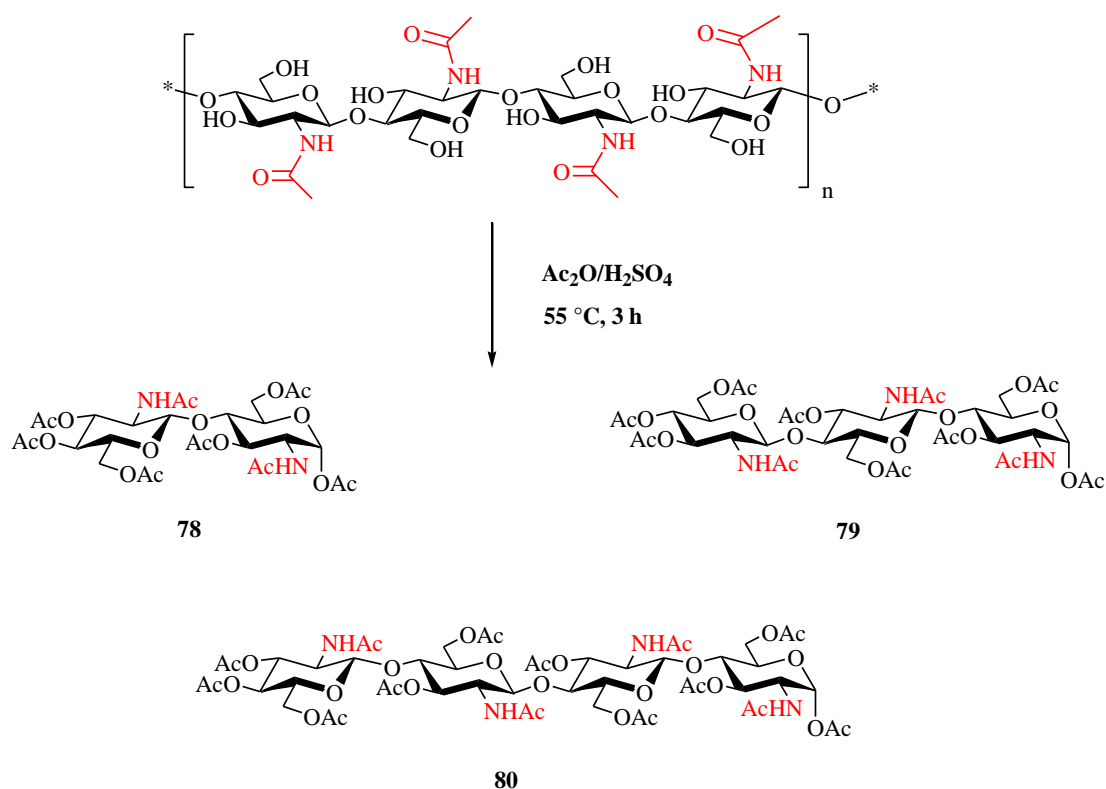


Schéma 63

Kuzuhara et *coll.*¹⁴⁴ ont suivi un protocole d'acétylation légèrement modifié par rapport à celui d'Inaba pour produire principalement le chitobiose **78**. L'acétylation a été réalisée sur de la chitine colloïdale, obtenue par traitement de la chitine avec de l'acide chlorhydrique concentré ($C = 12\text{ M}$) sous ultra-sons. 80g de chitine colloïdale ont été ensuite traitées par un mélange $\text{Ac}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ (10/1 v/v) à $55\text{ }^\circ\text{C}$ pendant 3 heures. La solution homogène résultante est laissée réagir pour 36 h supplémentaires à $35\text{ }^\circ\text{C}$. La purification du mélange conduit à 20 g de chitobiose **78** soit un rendement de 15%. Les auteurs mentionnent également un rendement brut de 10% pour le chitotriose peracétylé. C'est à l'heure actuelle le rendement le plus élevé en chitobiose peracétylé provenant de la dégradation de l' α -chitine.

Kurita et *al.*¹⁴⁵ ont utilisé la β -chitine, extraite de calmar (*Ommastrephes bartrami*), pour la production de chitooligosaccharides. La β -chitine est caractérisée par un arrangement plus lâche des chaînes principales (i.e. moins de liaisons hydrogène intermoléculaires entre les chaînes comparé à l' α -chitine) ce qui lui confère des propriétés de solubilité plus élevées comparées à celles de la forme α . La comparaison entre les deux allomorphes est résumée dans le tableau suivant :

¹⁴⁴ S.-I. Nishimura, H. Kuzuhara, Y. Takiguchi, K. Shimahara, *Carbohydr. Res.* **1989**, 194, 223-231.

¹⁴⁵ K. Kurita, K. Tomita, S. Ishii, S.-I. Nishimura, K. Shimoda, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* **1993**, 31, 2393-2395.

	Conditions réactionnelles				Rendement des COS (%)			
	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	DP1	DP2	DP3	DP4
β-chitine	55	0.5	35	24	6	17	15	8
	55	1	35	24	7	16	10	7
α-chitine	55	1	35	24	12	14	17	6

Tableau 8

Les auteurs ont observé que la β -chitine est complètement solubilisée dans le milieu en moins de 20 minutes alors que 50-70 minutes sont nécessaires pour l'homogénéisation de la solution en présence d' α -chitine. Ils se sont également aperçus que la réaction d'acétolyse de la β -chitine était reproductible, ce qu'ils attribuent à la différence de solubilité entre les deux allomorphes. Plus le temps de dissolution est long, plus la partie déjà solubilisée dans le milieu sera dégradée pour donner la *N*-acétylglucosamine peracétylée.

II.B. Autres méthodes de dépolymérisation

La dépolymérisation enzymatique est principalement induite par des chitinases et chitosanases.¹⁴⁶ Les enzymes ont la particularité d'être très spécifiques mais, malheureusement, peu d'entre elles sont commerciales ce qui rend leur utilisation limitée. Pour palier ce problème, une mixture d'enzymes moins spécifiques comme les lysozymes, glycanases et lipases ont été reportées pour la dégradation du chitosane pour conduire aux oligomères de degré de polymérisation supérieur à 6.¹⁴⁷ Un champignon (*Lecanicillium fungicola*) a été également utilisé comme source de chitinase pour produire des chitooligosaccharides à partir de la chitine.¹⁴⁸

Une étude montre également que certaines substances radioactives comme le ⁶⁰Co, par émission de rayonnement gamma, pouvaient dépolymériser le chitosane en oligomères de faible poids moléculaire.¹⁴⁹

II.C. Synthèse de chitooligosaccharides par réaction d'acétolyse

Le but de notre thèse était d'essayer de valoriser la biomasse et plus particulièrement la chitine. Afin d'obtenir des oligomères de tailles bien définies, nous avons choisi de dépolymériser sélectivement la chitine commerciale par une réaction d'acétolyse. Comme nous venons de le voir, cette approche conduit à la formation de produits complètement protégés ce qui nous facilitera leur manipulation.

¹⁴⁶ F. Shahidi, R. Abuzaytoun, *Adv. Food. Nutr. Res.* **2005**, *49*, 93-135.

¹⁴⁷ J. C. Cabrera, P. Van Cutsem, *Biochem. Eng. J.* **2005**, *25*, 165-172.

¹⁴⁸ L. Ramírez-Coutiño, M. d. C. Marín-Cervantes, S. Huerta, S. Revah, K. Shirai, *Process Biochem.* **2006**, *41*, 1106-1110.

¹⁴⁹ R. Yoksan, M. Akashi, M. Miyata, S. Chirachanchai, *Radiat. Res.* **2004**, *161*, 471-480.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

Au laboratoire, nous avons utilisé un protocole légèrement modifié d'acétylyse nous permettant de nous affranchir de préparer de la chitine colloïdale, chitine donnant les meilleurs rendements. Notre dépolymérisation contrôlée débute donc par un chauffage à 55 °C d'une suspension de 60 g de chitine dans un mélange Ac₂O/H₂SO₄ (10/1 v/v) pour une durée de 3 h. Ce chauffage permet probablement de dégrader une partie de la chitine la rendant plus soluble dans le milieu. Nous avons préalablement observé que la température et la durée de la réaction influent fortement la dépolymérisation sélective de la chitine en chitooligosaccharides. En effet, un chauffage et un temps de réaction prolongés conduit majoritairement au monomère de *N*-acétylglucosamine peracétylée. Le mélange est donc laissé seulement 16 h à température ambiante. Si des résidus solides persistent, un court chauffage d'une heure à 55 °C est appliqué ce qui permet une homogénéisation de la solution. Après neutralisation, une purification sur gel de silice réalisée par un système de purification automatisé (CombiFlash®) nous permet d'isoler cinq fractions de manière efficace et rapide. Le gradient de chromatographie que nous avons mis au point permet de séparer l'aldéhyde α,β -insaturé **81** de la *N*-acétylglucosamine peracétylée α **82** (DP1). Les trois fractions suivantes correspondent respectivement aux dimère, trimère et tétramère accompagnés de leur produits secondaires, les aldéhydes α,β -insaturé ¹⁵⁰ correspondants. Ces impuretés sont éliminées soit par recristallisation dans une solution MeOH/Et₂O pour le dimère et trimère soit par précipitation pour le tétramère. Les oligomères dont le degré de polymérisation est supérieur à 4 ne peuvent pas être séparés mais sont tout de même isolés (sixième fraction).¹⁵¹

¹⁵⁰ E. W. Thomas, *Carbohydr. Res.* **1973**, *26*, 225-226.

¹⁵¹ Ce protocole modifié a été initialement mis au point dans le laboratoire par Aurélien Alix.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

		DP1	DP2	DP3	
Chitine	$\xrightarrow{\text{Ac}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4}$	6.5%	13.1%	8.2%	Lot 1
(60g)	3 h à 55 °C → 16 h à t.a	2.5%	4.1%	1.7%	Lot 2



Schéma 64

Dans les conditions optimisées, 60 g de chitine aboutit à 13.2 g de **78** (13.1%), 7.8 g de **79** (8.2%) et 6 g de **80** (6.5%) sans oublier la présence du monomère peracétylé **82** (6.96 g, 6.1%).¹⁵² Cette réaction conduit aux produits thermodynamiquement les plus stables de configuration α sur le sucre réducteur.

Nous avons réalisé plusieurs fois cette réaction et nous avons remarqué que les rendements varient en fonction du lot de chitine. En effet, les rendements isolés avec ce nouveau lot sont respectivement de 2.5% de DP1 (2.9 g), 4.1% DP2 (4.12 g) et 1.7% DP3 (1.62 g). Par contre, le DP4 n'a pas été isolé vu que ce substrat n'a pas été considéré pour notre projet d'organocatalyse ou pour les réactions de glycosylation induites par micro-ondes. L'utilisation de chloroforme comme solvant d'extraction, à la place du dichlorométhane, n'a pas permis améliorer les résultats.

Quoiqu'il en soit, il est important de noter que notre approche présente l'avantage d'accéder à des chito oligomères de degré de polymérisation DP2, DP3 et DP4 en une seule étape avec des rendements supérieurs à ceux obtenus dans la littérature.

Afin d'obtenir une petite bibliothèque d'organocatalyseurs, nous avons choisi de fonctionnaliser la position anomérique par une réaction de glycosylation.

III. Etudes des réactions de glycosylation sous activation micro-ondes

Cette partie sera divisée en trois parties. Les deux premières parties résumeront le principe des réactions de glycosylation et notamment celles réalisées sous activation micro-ondes. La dernière partie présentera nos principaux résultats.

¹⁵² G. Despras, A. Alix, D. Urban, B. Vauzeilles, J.-M. Beau, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **2014**, 53, 11912–11916.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

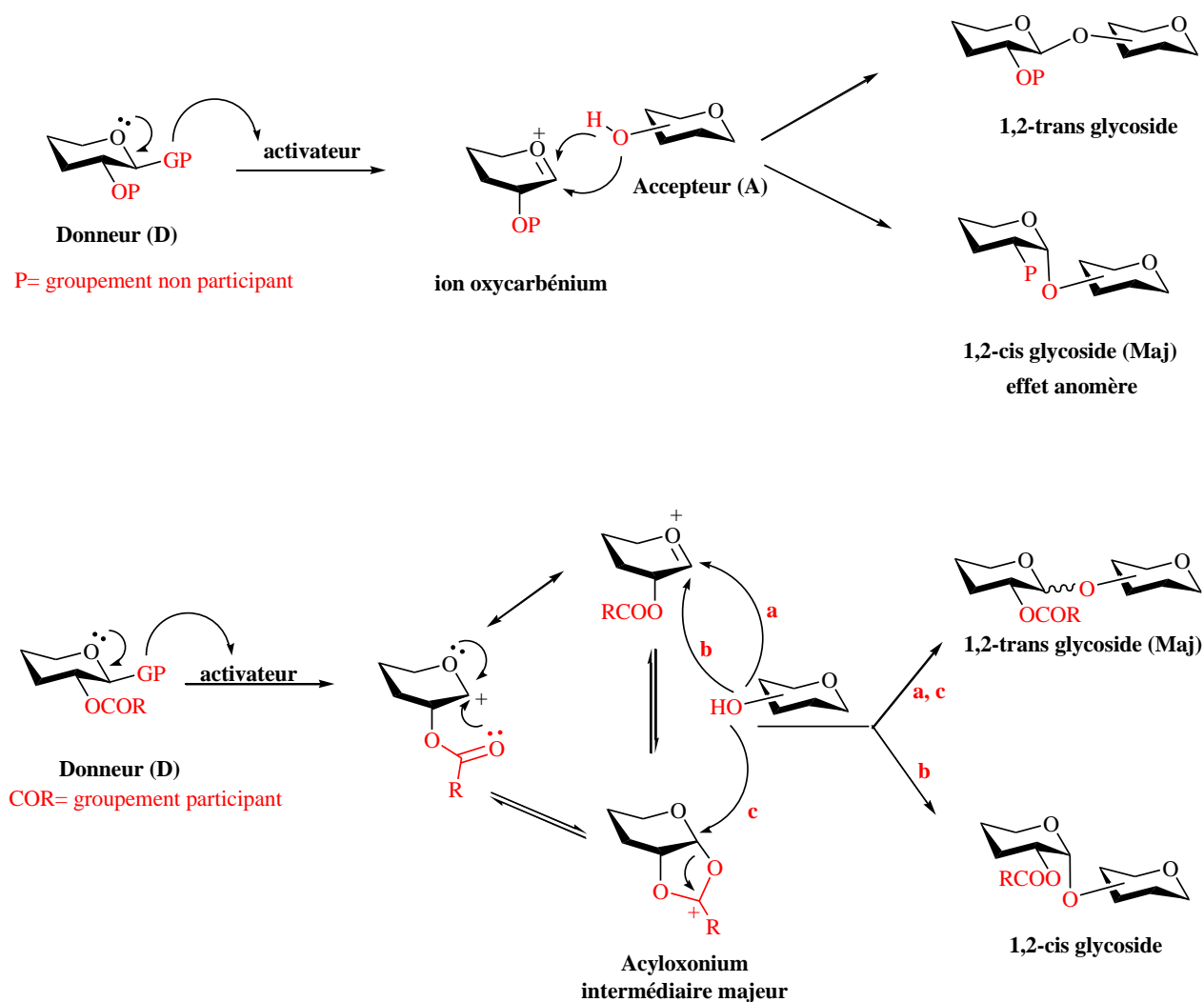


Schéma 66

Dans tous les cas, un promoteur va activer le groupe partant en position anomérique. Le départ de ce dernier est favorisé par la délocalisation du doublet anti-liant de l'oxygène endocyclique aboutissant ainsi à la formation de l'ion oxycarbénium. Dans le cas d'un donneur ne possédant pas de groupement participant en position 2, l'attaque du nucléophile (accepteur) peut se faire sur les deux faces du carbone anomère hybridé sp^2 pour donner un mélange de glycosides 1,2-trans et 1,2-cis. Même si le produit α thermodynamiquement est favorisé en raison de l'effet anomère,¹⁵⁵ une quantité non négligeable de produit cinétique β est présente. Divers facteurs tels que la température, le solvant, le promoteur, l'encombrement stérique, les groupements protecteurs, la conformation ou les groupes partants peuvent alors influencer la stéréosélectivité de la réaction de glycosylation.¹⁵⁶

¹⁵⁵ I. Tvaroška, T. Bleha, in *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.*, Vol. 47 (Eds.: R. S. Tipson, H. Derek), Academic Press, 1989, pp. 45-123.

¹⁵⁶ a) A. V. Demchenko, *Synlett* **2003**, 1225-1240; b) A. V. Demchenko, *Curr. Org. Chem.* **2003**, 7, 35-79.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Dans le cas où le donneur possède un groupement participant, tel un acétate, benzoate ou phtalimide, l'ion oxycarbénium est en équilibre avec une structure bicyclique, appelée acyloxonium. La formation de cet intermédiaire réactionnel empêche alors toute attaque du nucléophile par la face α conduisant exclusivement au glycoside 1,2-trans (voie c). Dans certains cas, lorsque les nucléophiles sont peu réactifs par exemple, le produit 1,2-cis peut être également obtenu. La formation de ce produit minoritaire s'explique par le piégeage de l'ion oxycarbénium, en équilibre avec l'acyloxonium.

III.B. Réactions de glycosylation assistée par les micro-ondes

Compte-tenu du grand nombre de publications sur les activations micro-ondes, nous intéresserons uniquement aux réactions de glycosylation impliquant des dérivés de la *N*-acétylglucosamine ou de la *N*-acétylgalactosamine.

III.B.1. L'activation micro-ondes en chimie organique

Le chauffage par micro-ondes est une méthode très intéressante pour les applications chimiques et est devenu une source d'énergie non conventionnelle largement utilisée.¹⁵⁷ La synthèse organique activée par micro-ondes est caractérisée par l'accélération spectaculaire des réactions, conséquence d'un chauffage rapide, des rendements plus élevés, des conditions de réaction plus douces et des temps de réaction plus courts peuvent être obtenus permettant une amélioration de nombreuses réactions.¹⁵⁸ Ce mode d'activation permet également d'effectuer des réactions qui ne se produisent pas par chauffage conventionnel. L'effet du chauffage rapide ne peut pas expliquer à lui seul ce phénomène, ce qui a conduit plusieurs auteurs à postuler l'existence d'un "effet micro-ondes".¹⁵⁹ Par conséquent, l'accélération ou la modification de la réactivité et de la sélectivité pourraient s'expliquer par un effet spécifique du rayonnement et non pas seulement que par un effet thermique. L'activation micro-ondes est donc une combinaison d'effets thermiques résultant de l'agitation moléculaire causée par l'inversion des dipôles avec les alternances du champ électrique (la surchauffe, les points chauds et le chauffage sélectif) et d'effets non thermiques (i.e. interaction du matériau avec le champ des micro-ondes, similaires à l'effet thermique).

III.B.2. Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Peu d'études ont été réalisées sur les réactions de glycosylation assistées par micro-ondes impliquant des dérivés de la *N*-acétylglucosamine ou *N*-acétylgalactosamine. Mukhopadhyay et coll.¹⁶⁰ ont démontré que l'acide sulfurique supporté sur de la silice (H_2SO_4 -silice) est un bon promoteur pour la réaction de glycosylation entre la β -*N*-acétylglucosamine peracétylée **83** et différents alcools aliphatiques ou aromatiques (Tableau 9).

¹⁵⁷ C. O. Kappe, *Chem. Soc. Rev.* **2008**, 37, 1127-1139.

¹⁵⁸ Ü. Yılmaz, H. Küçükbay, S. Deniz, N. Şireci, *Molecules* **2013**, 18, 2501-2517.

¹⁵⁹ A. de la Hoz, A. Diaz-Ortiz, A. Moreno, *Chem. Soc. Rev.* **2005**, 34, 164-178.

¹⁶⁰ S. Mandal, N. Sharma, B. Mukhopadhyay, *Synlett* **2009**, 3111-3114.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

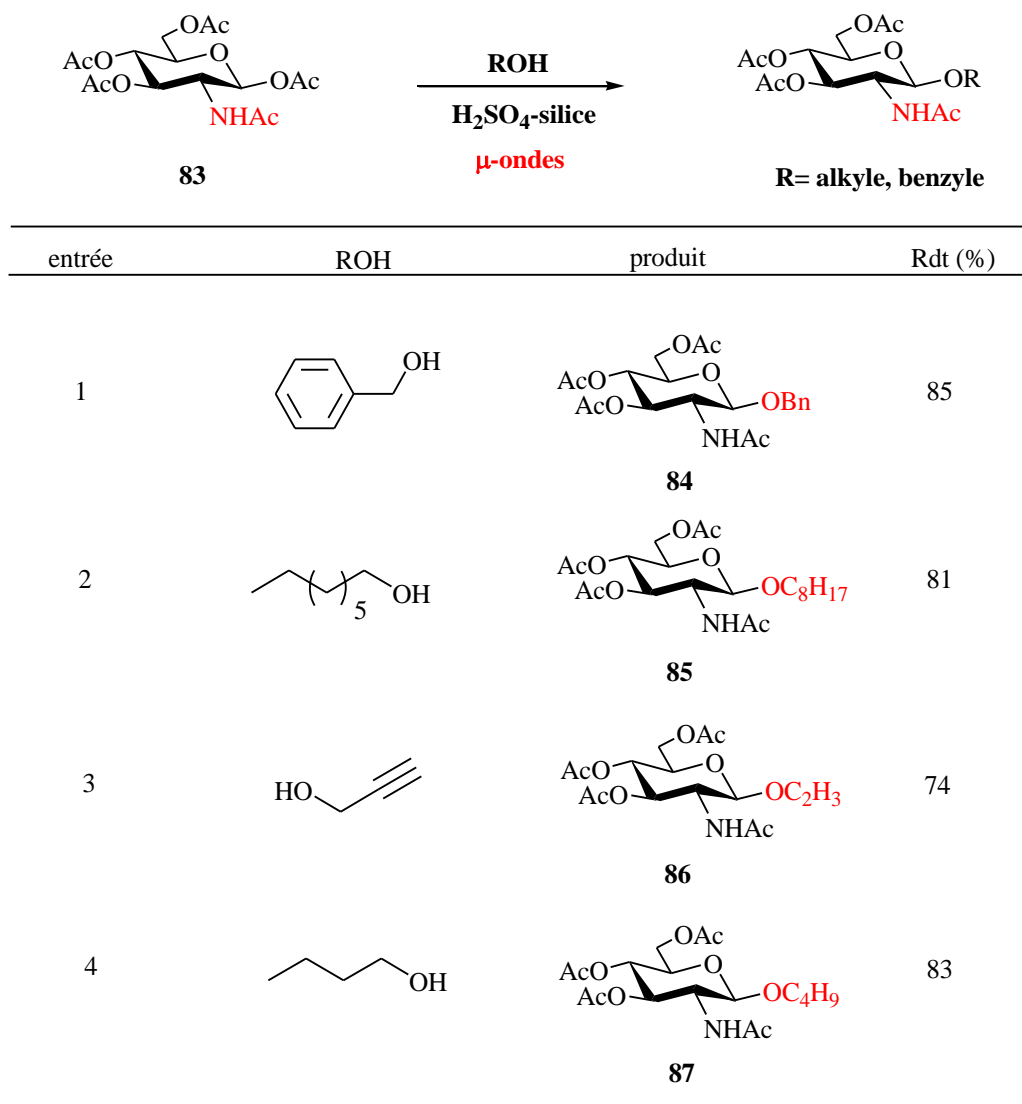


Tableau 9

Les conditions optimales utilisent le 1,2-dichloroéthane (DCE) comme solvant avec une température de chauffage de 110 °C et un temps de réaction qui n'excède pas les 30 minutes. Lors des réactions, l'accepteur est utilisé en défaut. Les rendements de glycosylation sont élevés et seuls les β -glycosides sont isolés. Cette stéréosélectivité s'explique par la présence d'un groupement participant en position 2 du donneur.

Le champ d'application de cette méthode a ensuite été étendu à d'autres types de donneurs comme la *N*-acétylgalactosamine peracétylée **88**. Nous présentons dans le schéma ci-dessous, la réaction en présence d'un accepteur glycosidique possédant une fonction alcool sur la position 6 (Schéma 67).

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

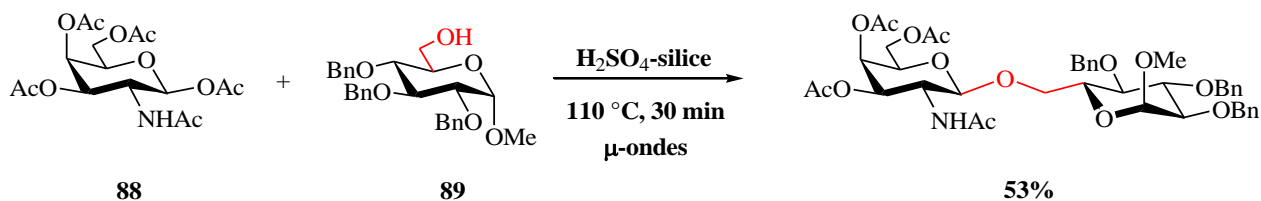


Schéma 67

Dans ce cas, une diminution du rendement est observée mais cette réaction reste un exemple significatif de la formation stéréosélective d'une liaison glycosidique β-1,6.

L'intérêt de cette méthode réside principalement dans le faible coût du promoteur et du fait qu'il peut être facilement séparé du milieu réactionnel par simple filtration.

D'autre part, des réactions similaires ont été réalisées par Jensen et coll.¹⁶¹ en utilisant des promoteurs tels que des triflates de terres rares comme acide de Lewis (e.g. Dy(OTf)₃, Sm(OTf)₃, Sc(OTf)₃, etc....). Les tests préliminaires, réalisés en chauffage classique, ont montré que le triflate de scandium était le meilleur promoteur. Une étude mécanistique a mis en évidence la formation d'un intermédiaire réactionnel, l'oxazoline **90**. Le promoteur acide catalyse d'abord la formation de cette entité avant l'attaque nucléophile sur la face β (Schéma 68).

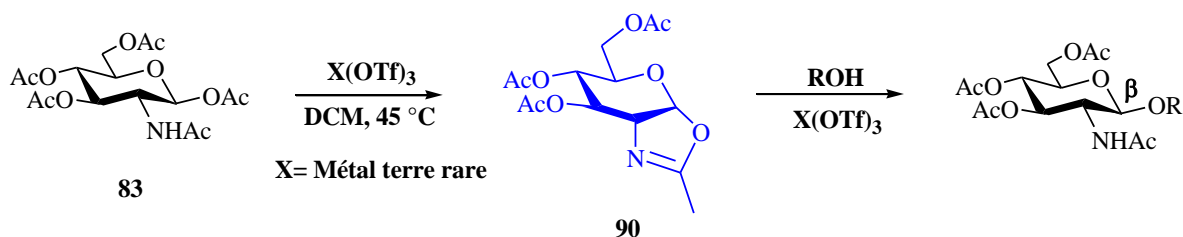


Schéma 68

La transposition au chauffage micro-ondes s'est révélée être bénéfique : les rendements de glycosylation ont été augmentés tout en diminuant les temps de réaction. Par exemple, le disaccharide **90** a été obtenu avec un rendement de 21% par chauffage classique dans le dichlorométhane à reflux pendant 72 h. La même réaction sous activation micro-ondes a permis d'augmenter le rendement à 43% et de diminuer considérablement le temps de réaction (16 h) même si la température du milieu était différente (80 °C).

¹⁶¹ H. Christensen, M. S. Christiansen, J. Petersen, H. H. Jensen, *Org. Biomol. Chem.* **2008**, *6*, 3276-3283.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

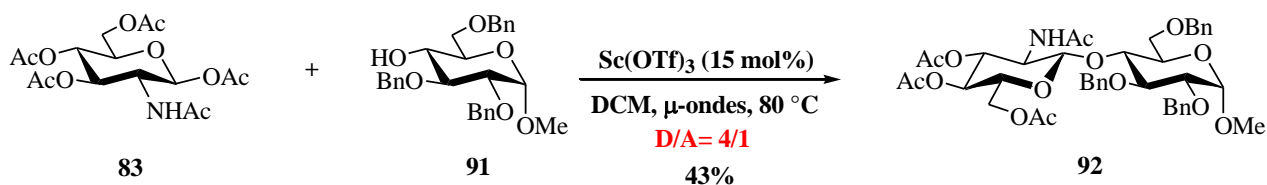


Schéma 69

L'activité catalytique des triflates de terres rares a amené l'équipe de Beau et *coll.* à tester le triflate de fer, $\text{Fe(OTf)}_3 \cdot 6,2 \text{ DMSO}$, comme promoteur. Ce promoteur, à faible coût, s'est révélé performant dans les réactions impliquant des accepteurs de type glycosidique (Tableau 10).¹⁶²

entrée	donneur	accepteur	produit	Rdt (%)
1 ^a	83	 91	 92	20
2	83	 93	 95	70
3	83	 94	 96	76

^a Conditions expérimentales: D/A= 2/1, μ -ondes, DCM, 80 °C, 15 mol% $\text{Fe(OTf)}_3 \cdot 6,2 \text{ DMSO}$, 2 éq. TTBP

Tableau 10

Ainsi des disaccharides β -1,3, β -1,4 et β -1,6 ont pu être obtenus avec des rendements variant de 20 à 76%. L'ajout d'une base azotée, la 2,4,6-tri-tert-butylpyrimidine (TTBP), a eu pour conséquence d'augmenter les rendements des réactions et de minimiser la dégradation du donneur et de l'accepteur, surtout lorsque les accepteurs possédaient des groupements silylés. Le temps des réactions de glycosylation sous irradiation micro-ondes ne dépasse pas les 3 heures.

¹⁶² A. Stévenin, F.-D. Boyer, J.-M. Beau, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 1699-1702.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Les auteurs ont réalisé une série d'expériences qui montrent que la réaction ne transite pas forcément par un intermédiaire oxazolinium et proposent donc le mécanisme suivant :

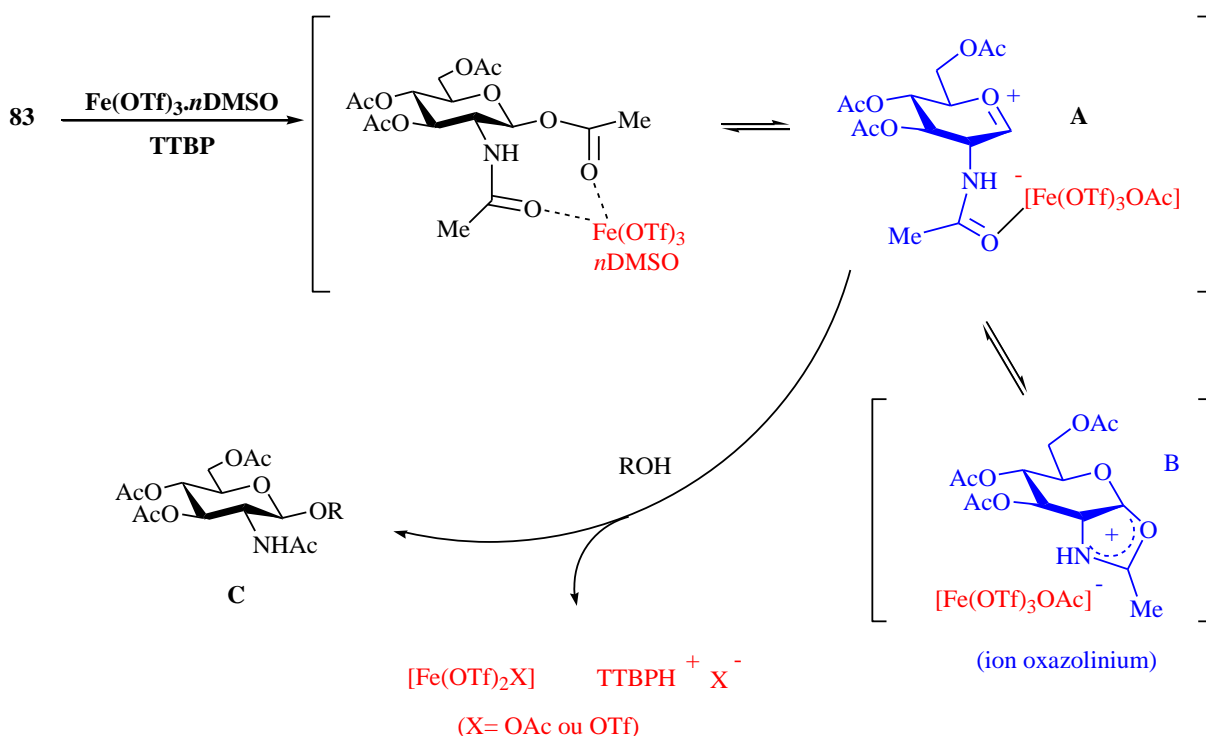


Schéma 70

Une précomplexation du triflate de fer aux groupements carbonyles des fonctions acétamide et acétate de la position anomérique facilite le départ du groupe partant. Selon les auteurs, la face β de l'oxycarbénium serait encombrée par la présence du catalyseur, qui serait sans doute encore complexé au groupement acétamide, obligeant ainsi une attaque du nucléophile sur la face α . Ces synthèses sous irradiation micro-ondes ont aussi été appliquées aux dérivés de la *N*-acétylgalactosamine et les mêmes auteurs ont montré que l'irradiation micro-ondes peut être substituée par une approche de chimie en flux continu.¹⁶³

Ces exemples de réactions assistées par micro-ondes utilisent cependant comme donneurs la *N*-acétylglucosamine peracétylée de configuration β , anomère plus réactif que son analogue α . Comme nous l'avons vu précédemment, l'acétolyse de la chitine conduit exclusivement aux produits thermodynamiquement les plus stables (α). Nous avons voulu connaître la réactivité de ces produits vis-à-vis d'une activation micro-ondes.

¹⁶³ A. Xolin, A. Stévenin, M. Pucheault, S. Norsikian, F.-D. Boyer, J.-M. Beau, *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 992-1000.

III.C. Etudes des réactions de glycosylation impliquant la *N*-acétylglucosamine peracétylée sous micro-ondes

III.C.1. Résultats préliminaires

Dans la littérature, la *N*-acétylglucosamine peracétylée α **82** n'a pas été largement utilisée comme donneur compte-tenu de sa faible réactivité. Les quelques exemples de réactions de *O*-glycosylations sous chauffage classique que nous avons trouvés nécessitent une activation par un acide de Lewis à une température supérieure à 40 °C et un temps de réaction très long.¹⁶⁴ De plus, Buskas et *al.* ont rapporté que ce composé pouvait également réagir avec un excès de triméthyl(phénylthio)silane ou le triméthyl(éthylthio)silane **97** (4 éq.), en présence de ZnI₂ comme promoteur, à 50 °C, pour conduire exclusivement au β -thioglycoside **98** avec d'excellents rendements.¹⁶⁵

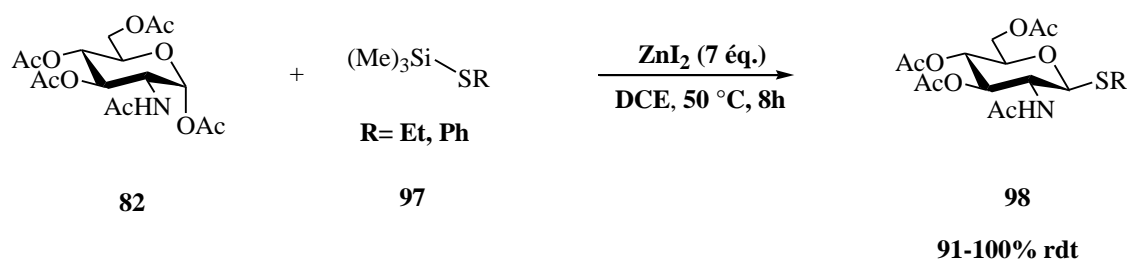


Schéma 71

Nous avons voulu savoir si une activation micro-ondes ne pourrait pas nous permettre de fonctionnaliser la position anomère des produits de dépolymérisation de la chitine permettant ainsi d'obtenir des catalyseurs se différenciant par leur partie aglycone.

III.C.1.a. Réactions en présence d'alcools silylés

Nous nous sommes d'abord intéressés à étudier la réactivité du donneur **82** vis-à-vis d'alcools silylés **99** dans les conditions mentionnées dans le schéma 71.

¹⁶⁴ a) B. Bhatt, R. Böhm, P. S. Kerry, J. C. Dyason, R. J. M. Russell, R. J. Thomson, M. von Itzstein, *J. Med. Chem* **2012**, *55*, 8963-8968; b) J.-L. de Paz, R. Ojeda, Á. G. Barrientos, S. Penadés, M. Martín-Lomas *Tetrahedron: Asymmetry* **2005**, *16*, 149-158.

¹⁶⁵ T. Buskas, P. J. Garegg, P. Konradsson, J.-L. Maloisel, *Tetrahedron: Asymmetry* **1994**, *5*, 2187-2194.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

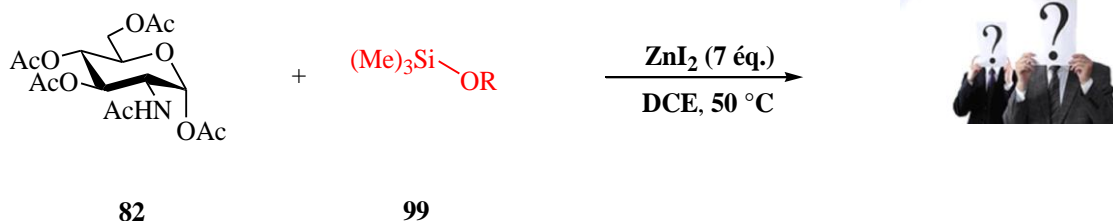


Schéma 72

Un chauffage classique d'une solution de **82** et d'alcool silylé **100**, en présence de ZnI_2 , n'a pas fourni de produits de glycosylation même après une nuit. Seuls les produits de départ ont été récupérés avec un sous-produit résultant de la désilylation de **100**.

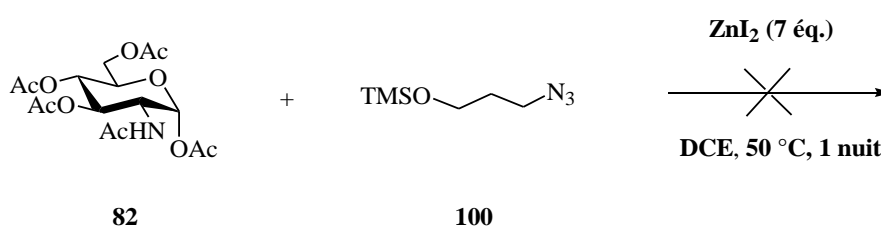


Schéma 73

Les réactions ont alors été réalisées dans un réacteur micro-ondes de type CEM DISCOVER®. Parmi le mélange complexe de produits, le β -glycoside **101**, l'oxazoline **90**, et le donneur **82** sont obtenus. Nous avons pu estimer par RMN du mélange brut les rendements en produit de glycosylation et en oxazoline, qui sont respectivement de 5 et 10%.

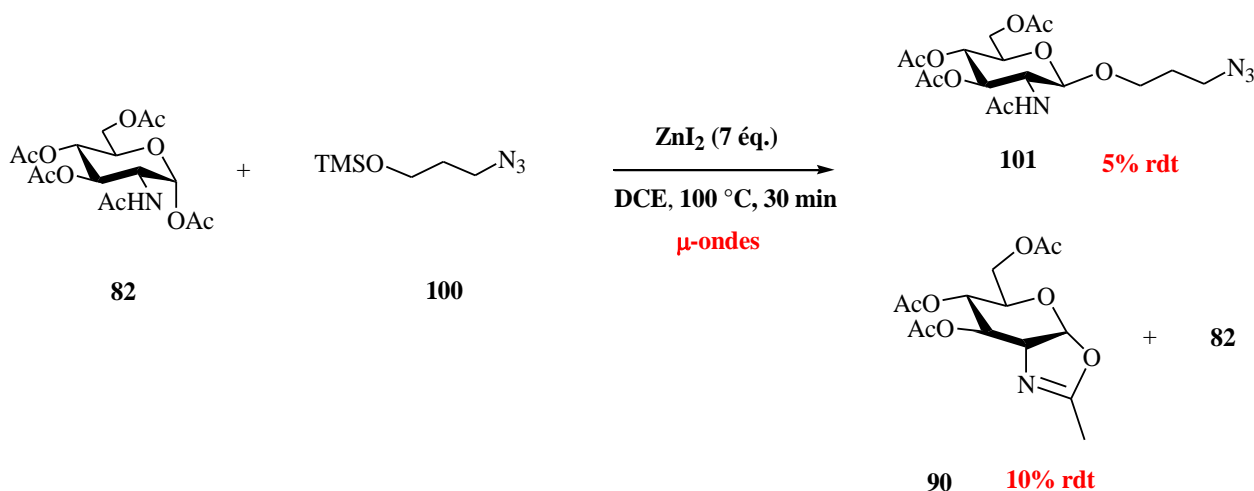


Schéma 74

Il est clairement visible qu'une partie du ZnI_2 se décompose pour donner de l'iode moléculaire (I_2), dont la couleur pourpre dans le DCE peut être « décolorée » en traitant avec une solution de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Le remplacement de ZnI_2 par ZnCl_2 n'a pas permis d'améliorer les résultats.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

De même, l'utilisation d'autres promoteurs, comme CuBr_2 ou SnCl_2 , s'est révélée infructueuse (Schéma 75).

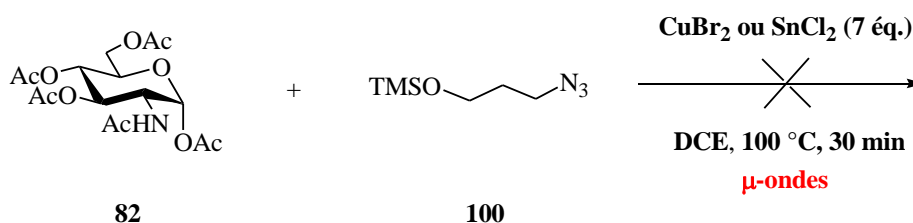


Schéma 75

Comme les résultats préliminaires ont montré que les promoteurs zinciques étaient capables de catalyser la réaction de glycosylation, nous avons décidé d'utiliser le triflate de zinc ($\text{Zn}(\text{OTf})_2$), pensant que la présence d'un groupe fortement électroattracteur comme le triflate pourrait accroître le caractère acide de Lewis du centre métallique. De plus, l'accepteur **100** a été remplacé par un autre qui ne contient pas de groupements labiles comme l'azoture ($-\text{N}_3$) susceptibles de se décomposer sous l'effet de la chaleur.¹⁶⁶ L'accepteur que nous avons choisi est simplement le n-butanol silylé **104** synthétisé par la réaction entre le n-butanol **102** et l'hexaméthylidisilazane (HMDS) **103** en présence de triflate de triméthylsilyle comme catalyseur.¹⁶⁷

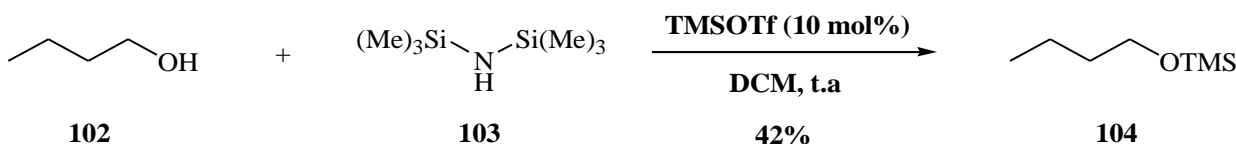


Schéma 76

La réaction entre la *N*-acétylglucosamine peracétylée et un excès de butanol silylé (4 équ.), en présence d'un excès de $\text{Zn}(\text{OTf})_2$ sous irradiation micro-ondes, a permis d'isoler le produit de glycosylation **87** avec un rendement isolé de 20%.

¹⁶⁶ a) H. Bock, R. Dammel, *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, *110*, 5261-5269; b) H. Bock, R. Dammel, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1987**, *26*, 504-526.

¹⁶⁷ A. A. Joseph, V. P. Verma, X.-Y. Liu, C.-H. Wu, V. M. Dhurandhare, C.-C. Wang, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 744-753.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

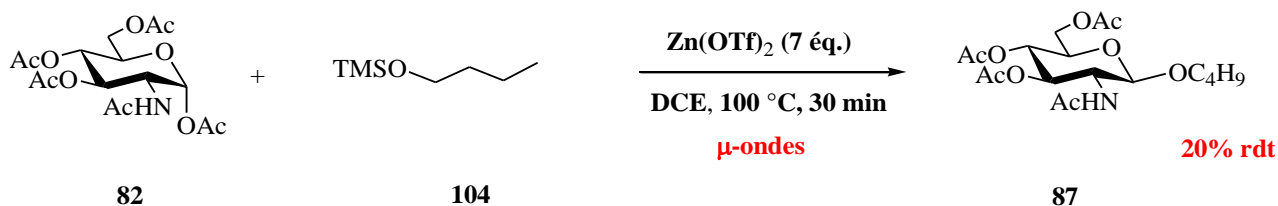


Schéma 77

La détermination de la constante de couplage entre les protons H-1 et H-2 ($J_{1,2}$), réalisée par analyse spectroscopique en RMN ¹H, nous a permis de clairement identifier l'isomère formé. En effet, la valeur que nous avons trouvée est de l'ordre de 8 Hz confirmant ainsi la relation 1,2-*trans* des substituants (Schéma 78). Cette stéréosélectivité est en accord avec la présence d'un groupement participant en position 2 du sucre donneur.

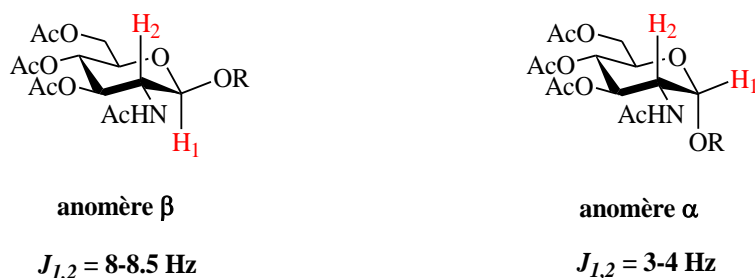


Schéma 78

III.C.1.b. Réactions en présence d'alcools non protégés

Les résultats obtenus avec les alcools protégés sous forme d'éthers silylés n'étant pas très concluants, nous avons décidé d'utiliser directement les alcools. Dans les mêmes conditions que précédemment, les produits de glycosylation ont été isolés avec un rendement de 66% mais, cette fois, sous la forme d'un mélange de diastéréoisomères dans un rapport, estimé par analyse RMN du proton, de 1/2 en faveur de l'isomère β.

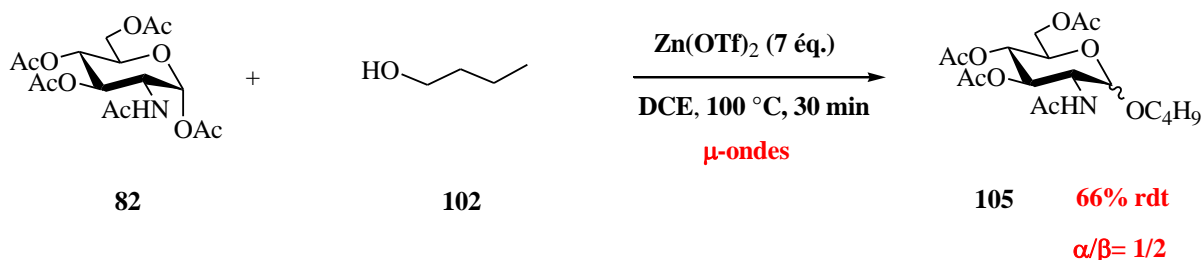
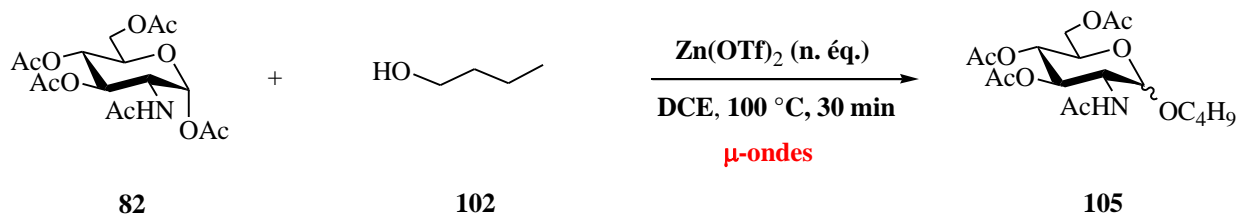


Schéma 79

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

Jusqu'à présent, un large excès de promoteur avait été utilisé. Le tableau suivant résume les principaux résultats de glycosylation en fonction de la quantité du promoteur.



entrée	Zn(OTf) ₂ (n. éq)	α/β	Rdt (%)
1	7	1/2	66
2	1	2.3/1	83
3	0.2	1/1.9	57

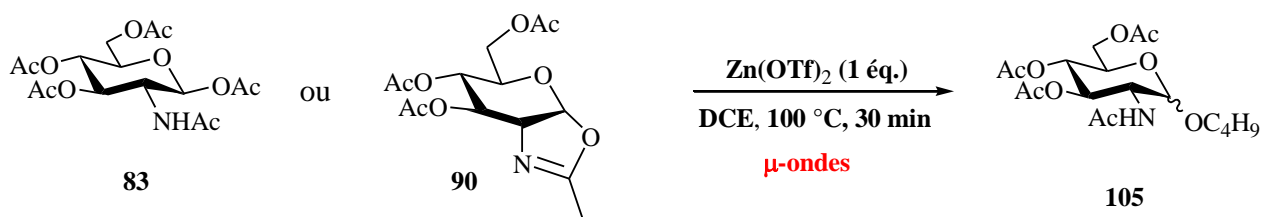
Tableau 11

L'utilisation de 0,2 équivalent de promoteur (entrée 3, Tableau 11) conduit aux produits de glycosylation avec un rendement modéré de 57%. L'augmentation de la quantité de promoteur à 1 équivalent permet une augmentation significative du rendement à 83% (entrée 2). Dans ces conditions, le rapport diastéréoisomérique est en faveur de l'anomère α suggérant une anomérisation *in situ*. Par contre, en présence d'un grand excès de promoteur (entrée 1), le rapport diastéréoisomérique est en faveur du composé β . Ce résultat surprenant pourrait être expliquée par la formation d'agrégats dûs à la complexation du ZnI₂ aux oxygènes du sucre **82** empêchant ainsi l'isomérisation.

Afin d'évaluer l'influence de l'activation micro-ondes, l'expérience correspondant à l'entrée 2 du tableau a été effectuée sous chauffage classique à 100 °C. Dans ces conditions, seul le produit de glycosylation de configuration α a été isolé avec un rendement de 9%. Ces résultats indiquent donc que l'activation par les micro-ondes permet d'augmenter les vitesses de réaction et les rendements.

Les conditions optimales, à savoir l'utilisation d'un équivalent de Zn(OTf)₂ dans le 1,2-dichloroéthane à 100 °C, ont été utilisées pour des réactions de glycosylation impliquant deux autres donneurs, l'oxazoline **90** et la *N*-acétylglucosamine peracétylée β **83**. Le tableau 12 montre les différents résultats obtenus en présence de butanol.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes



entrée	donneur	α/β	Rdt (%)
1	82	2.3/1	83
2	90	1/2	73
3	83	2.5/1	81

Tableau 12

Les résultats montrent que, sous ces conditions, l'anomère α est aussi réactif que l'anomère β . L'oxazoline **90** est également convertie en glycoside **105**. Mais dans ce dernier cas, l'anomère β est majoritaire. La prédominance de cet isomère est probablement due au fait que l'attaque du nucléophile en début de réaction ne peut se faire sur la face β de l'oxazoline.

III.D. Optimisation des réactions

Les résultats obtenus avec le triflate de zinc nous ont motivé à tester différents catalyseurs afin d'essayer de diminuer la quantité de promoteur sans induire une chute importante de rendement.

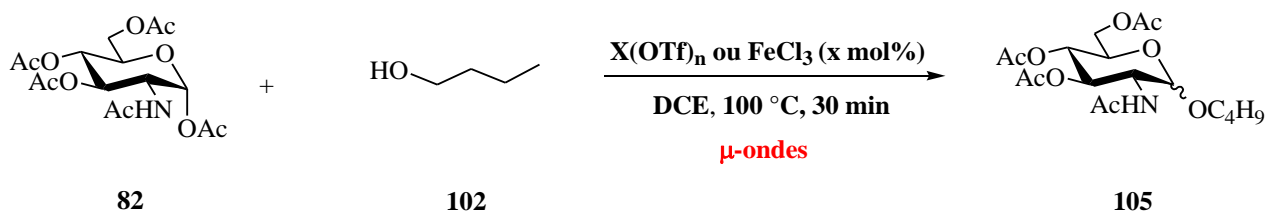
III.D.1. Influence du catalyseur

Parmi les catalyseurs testés, notre attention s'est portée sur le triflate de cuivre(II), connu pour promouvoir les réactions de glycosylation.¹⁶⁸ De plus, le laboratoire a une certaine expertise avec ce catalyseur, utilisé notamment pour la protection orthogonale et régiosélective de glucopyranosides par catalyse tandem.¹⁶⁹ Les résultats sont présentés ci-dessous :

¹⁶⁸ H. Yamada, T. Hayashi, *Carbohydr. Res.* **2002**, 337, 581-585.

¹⁶⁹ A. Français, D. Urban, J.-M. Beau, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, 46, 8662-8665.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes



entrée	X(OTf) _n	x mol%	α/β	Rdt (%)
1	Zn(OTf) ₂	20	1/1.9	57
2	Cu(OTf) ₂	20	1/0	70
3	Cu(OTf) ₂	15	13/1	69
4	Cu(OTf) ₂	5	2.6/1	94
5	Yb(OTf) ₃	5	1/5	33
6	FeCl ₃	15	1/2.4	35

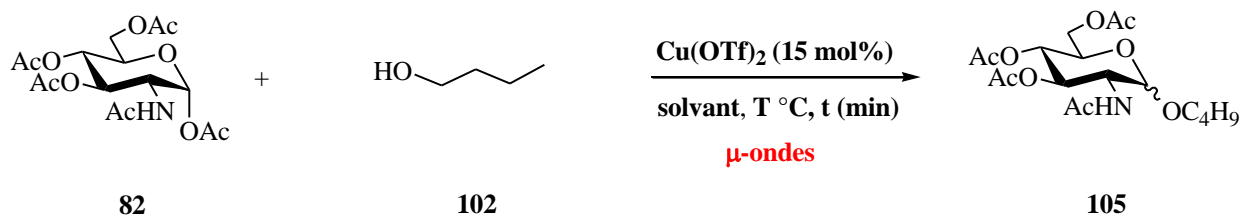
Tableau 13

Le Cu(OTf)₂ s'est révélé être un meilleur promoteur que le Zn(OTf)₂ dans la réaction de glycosylation entre la *N*-acétylglucosamine peracétylée α et le butanol (entrées 1 et 2) en terme de rendement. Il est important de noter que la stéréosélectivité de la réaction est également inversée et seul l'anomère α est isolé. La diminution de la quantité de triflate de cuivre(II) conduit à une augmentation significative du rendement mais malheureusement le rapport diastéréoisomérique en faveur de l'isomère α diminue. De plus, nous avons observé que lorsque la charge catalytique en Cu(OTf)₂ est importante, une partie du donneur se dégrade. L'utilisation du triflate d'ytterbium ou du chlorure ferrique, comme promoteurs, se sont révélés moins performants. Les rendements sont plus faibles qu'avec le triflate de cuivre(II) dans les mêmes conditions. Il est important de noter que les produits de glycosylations 1,2-trans sont isolés majoritairement avec ces promoteurs contrairement au triflate de cuivre(II).

En conclusion, il s'est avéré que le triflate de cuivre(II) peut promouvoir efficacement les réactions de glycosylation impliquant la *N*-acétylglucosamine peracétylée α sous activation micro-ondes. A notre connaissance, cela représente le seul exemple d'activation non conventionnelle de ce composé. Cette approche présente un double avantage à savoir un temps de réaction réduit (de plus de 12h à 30 minutes) et l'obtention majoritaire de glycosides de configuration α en présence d'un groupement acétamide en position 2.

III.D.2. Influences des autres paramètres

Nous avons donc adopté le $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ comme promoteur pour la suite de notre étude. Pour des raisons pratiques, nous avons étudié l'influence des autres paramètres, tels que la température, le solvant et le temps de réaction, en présence de 15% d'activateur.



entrée	t (min)	T °C	solvant	α/β	Rdt (%)
1	30	60	DCE	0/1	6
2	30	80	DCE	1/7	21
3	30	80	THF	1/0	7
4	30	100	DCE	13/1	69
5	40	100	DCE	20/1	58

Tableau 14

La réaction, effectuée dans le 1,2-dichloroéthane, est sensible aux changements de la température. En effet, à 60 °C ou 80 °C, la réaction est très lente puisque 6% ou 21% de produits désirés sont isolés (entrées 1 et 2). La température optimale est de 100°C. Une augmentation du temps de réaction à 40 min conduit à une chute de rendement significatif ; dans ces conditions, nous avons observé des réactions de désacétylation du donneur. Afin de palier ce problème, nous avons ajouté une base non nucléophile, la TTBP (1.3 éq.), afin de tamponner le milieu. L'addition de cette base conduit à une augmentation considérable du temps de réaction puisque seulement 21% de produits glycosylés ont été isolés. De plus, l'utilisation d'un solvant plus polaire comme le THF ne permet pas d'améliorer les résultats.

Il est important de signaler qu'une expérience témoin de l'entrée 5 a été réalisée sous chauffage classique. Seul le produit glycosylé de configuration β a été isolé avec un rendement faible de 12%.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Suite à cette étude, nous avons opté pour les conditions qui représentent un bon compromis entre rendement de réaction, rapport diastéréoisomérique et charge catalytique c'est à dire 15 mol% de $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ dans le 1,2-dichloroéthane à 100 °C pendant 40 minutes. Dans nos conditions, l'accepteur est utilisé en excès (4 équivalents).

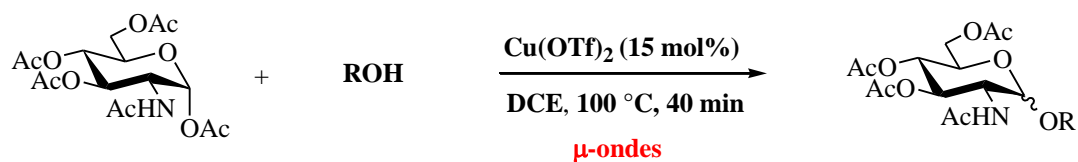
III.E. Extension à d'autres accepteurs

Notre approche a été ensuite étendue à différents accepteurs tels que des alcools aliphatiques ou alcools dérivés d'unités glycosidiques et des dérivés soufrés.

III.E.1. Résultats avec les alcools

Le tableau suivant résume les principaux résultats.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes



entrée ^a	ROH	produit	α/β	Rdt (%)
1		106	6/1	63
2		107	14/1	38
3		108	2.5/1	43
4		109	22/1	71
5		110	1/0	32
6		111	12/1	70
7		101	0/1	10
8		112	10/1	57
9		113	1/0	77

^a D/A= 1/4

Tableau 15

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

D'une manière générale, les réactions de glycosylation sous activation micro-ondes tolèrent de nombreux accepteurs. Les rendements sont en moyenne acceptables et les rapports diastéréoisomériques sont nettement en faveur de l'anomère de configuration α . Les meilleurs rendements et rapports diastéréoisomériques sont obtenus avec les alcools secondaires comme le cyclohexanol (entrée 4, 71%) et le (+)-menthol (entrée 9, 77%). Par contre, un très faible rendement est observé avec les alcools portant des groupements thermiquement labiles comme le 3-azido-1-propanol (entrée 7, 10%) qui peut se dégrader durant la réaction. La faible réactivité du phénol (entrée 5, 32%) peut être expliquée par les propriétés électroniques des composés aromatiques. Le doublet libre présent sur l'atome d'oxygène du phénol est engagé dans la mésomérie avec le noyau phényle et par conséquent ce doublet anti-liant est moins disponible pour l'attaque nucléophile.

Il est important de noter que la réaction se révèle très stéréosélective lorsque le (+)-menthol et le phénol sont utilisés comme entités nucléophiles avec la formation exclusive de l'anomère α .

Nous avons ensuite voulu diversifier les accepteurs en testant des nucléophiles oxygénés possédant d'autres groupements fonctionnels (e.g. amide, ester, etc...) ainsi que des nucléophiles aminés dans le but d'accéder à des *N*-glycosides, constituants des protéoglycanes, des glycoprotéines, des peptidoglycanes et des glycolipides dans les systèmes biologiques.¹⁷⁰ Ces accepteurs sont présentés dans le schéma 80.

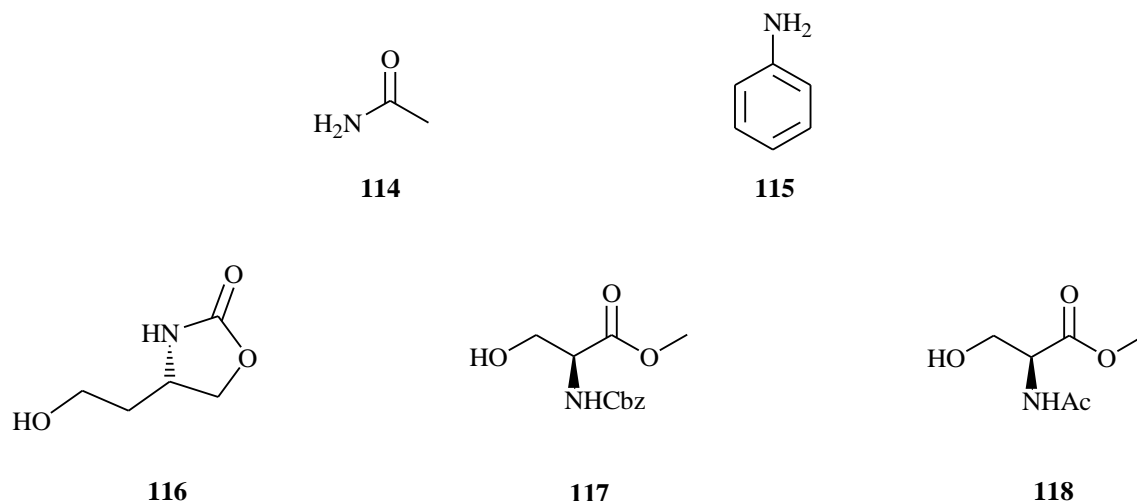


Schéma 80

Parmi ces espèces nucléophiles, seuls les composés dérivés de la L-sérine **117** et **118** ont été synthétisés. Ils sont obtenus, à partir de l'ester méthylique de la L-sérine, par simple

¹⁷⁰ S. Xiang, J. Ma, B. K. Gorityala, X.-W. Liu, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 2957-2959.

protection de la fonction amine sous forme de carbamate benzylique¹⁷¹ ou sous forme d'acétamide¹⁷².

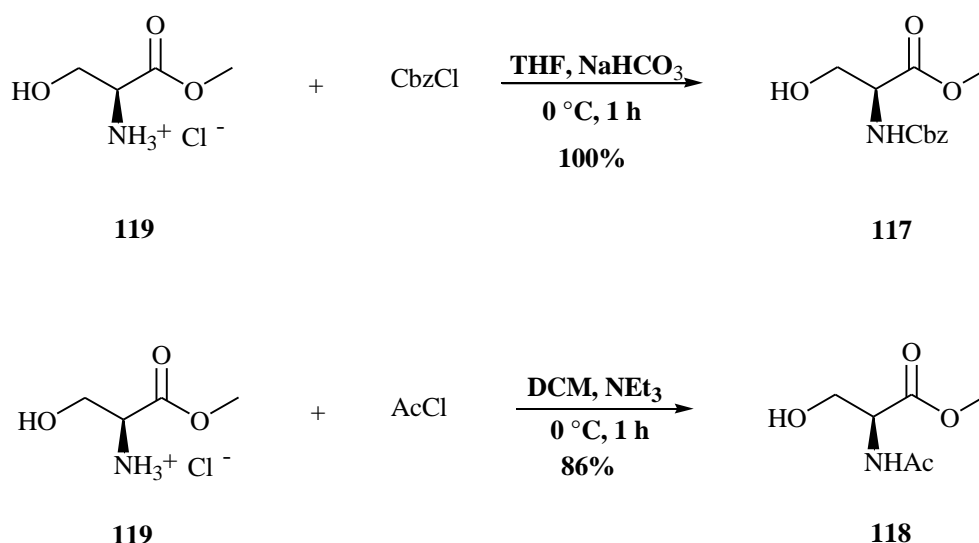


Schéma 81

Les accepteurs **114-118** ont été ensuite testés dans la réaction de glycosylation dans les conditions optimales. Malheureusement, aucun produit de glycosylation n'est formé. Une augmentation du temps de réaction, pouvant atteindre les 5 heures, n'a pas permis d'obtenir les produits désirés. Afin d'expliquer ce résultat, nous pouvons supposer que le catalyseur est complexé par les autres groupements fonctionnels le rendant ainsi inactif (Schéma 82).

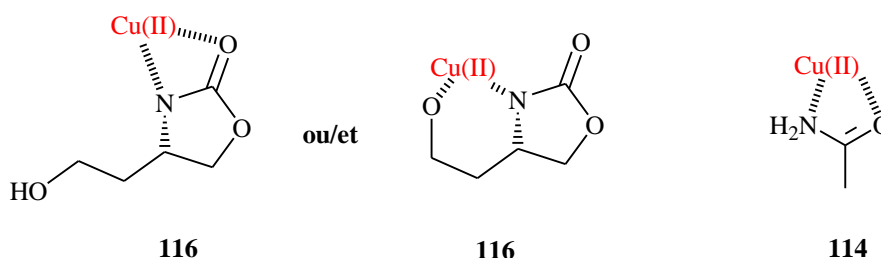


Schéma 82

III.E.2. Résultats avec les alcools dérivés de sucres

Afin d'accéder à des oligosaccharides, nous avons étudié la réactivité de quelques accepteurs dérivés de sucres représentés dans le schéma ci-dessous.

¹⁷¹ M. Iwashita, K. Makide, T. Nonomura, Y. Misumi, Y. Otani, M. Ishida, R. Taguchi, M. Tsujimoto, J. Aoki, H. Arai, T. Ohwada, *J. Med. Chem.* **2009**, *52*, 5837-5863.

¹⁷² C. Salomé, E. Salomé-Grosjean, K. D. Park, P. Morieux, R. Swendiman, E. DeMarco, J. P. Stables, H. Kohn, *J. Med. Chem.* **2009**, *53*, 1288-1305.

Reactions de glycosylation par activation micro-ondes

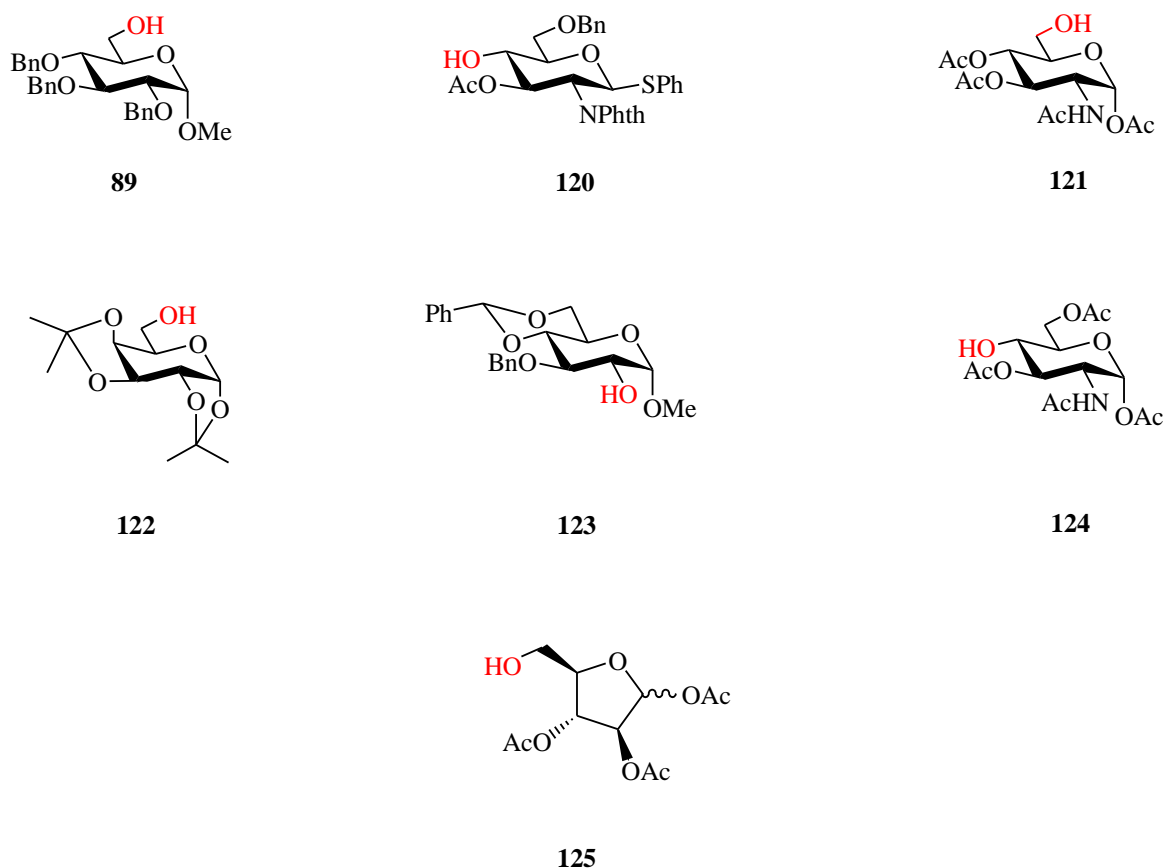


Schéma 83

Des hydrates de carbone dérivés du glucose, galactose et glucosamine diversement protégés ont été envisagés. La diversité des groupements protecteurs nous permettra d'évaluer la réactivité de chacun. Certains de ces accepteurs avaient été synthétisés au laboratoire et m'ont été gracieusement offerts. Seuls les composés **125** et **89** ont été élaborés selon des protocoles décrits dans la littérature. L'alcool **89** est obtenu en deux étapes à partir du méthyl 4,6-*O*-benzylidène glucopyranoside **126**. Une réaction de benzoylation en présence de BnBr et NaH suivie de l'ouverture réductrice et régiosélective de l'acétal par traitement au borane en présence du triflate de triméthylsilyle (TMSOTf) permettent d'obtenir l'alcool en position 6.¹⁷³

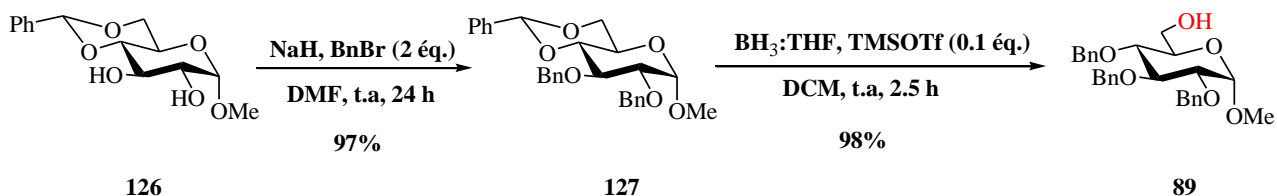


Schéma 84

¹⁷³ J. Kalikanda, Z. Li, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 2380-2383.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

D'un autre côté, trois étapes sont nécessaires pour l'obtention du dérivé d'arabinose **125**. L'installation d'un groupement trityle permet de protéger temporairement l'alcool primaire de l'arabinose **128**. Une réaction de peracétylation suivie de l'hydrolyse acide du groupement trityle conduisent au composé désiré **125** (Schéma 85).¹⁷⁴

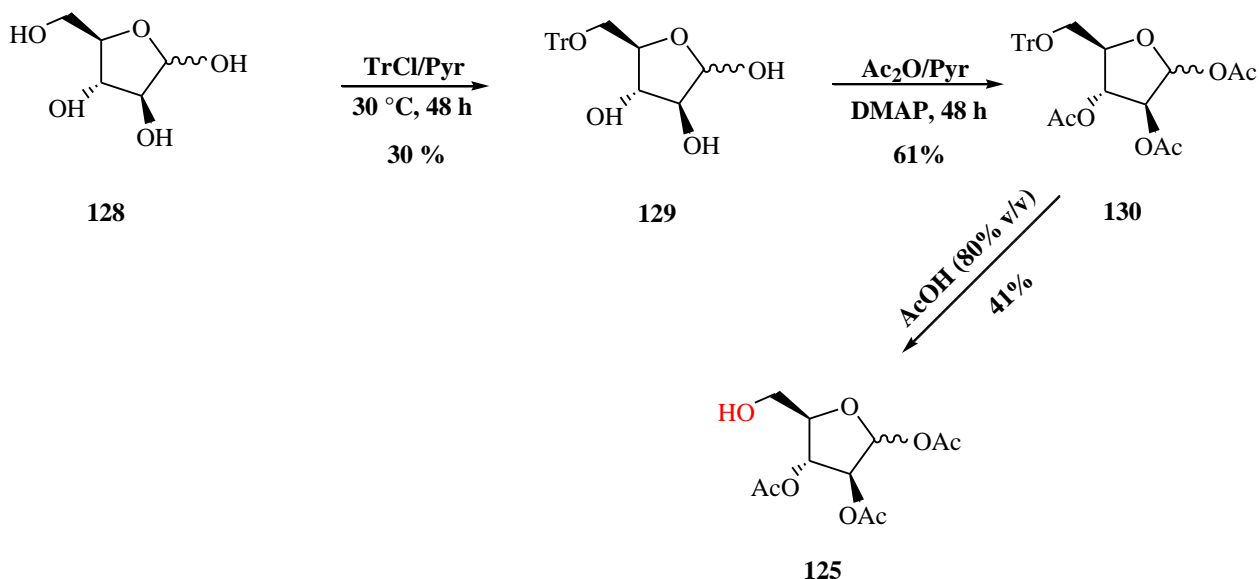


Schéma 85

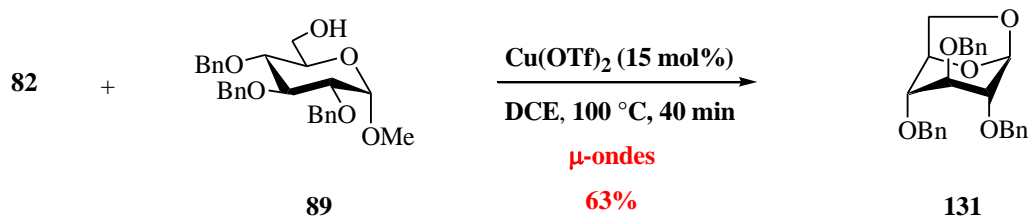
Ces accepteurs sont soumis aux conditions réactionnelles de glycosylation sous activation micro-ondes en présence de la *N*-acétylglucosamine peracétylée α . Ces conditions utilisent toujours un excès d'accepteur ($\text{D/A} = 1/4$) sauf pour la réaction impliquant le composé **123** où une quantité équimolaire de donneur et d'accepteur sont utilisés.

Malheureusement, les réactions de glycosylation se sont révélées infructueuses avec les accepteurs **120**, **121**, **123**, **124** et **125** après irradiation sous micro-ondes durant 40 minutes à 100 °C dans le DCE. Compte-tenu de la dégradation du composé **123**, la réaction est stoppée au bout de 12 minutes. La réaction en présence de l'accepteur **121** a été répétée avec un temps prolongé de 2h10. Ce composé ne s'est pas montré plus réactif malgré la présence d'une fonction alcool primaire. Ce sucre est toutefois considéré comme désarmé (par la présence des groupements acétyles) ce qui diminue fortement la nucléophilie de l'alcool. En présence de sucres armés comme l'accepteur **89**, les produits de glycosylation ne sont toujours pas observés et seul le produit 1,6-anhydro est isolé avec un rendement de 63%. Cette structure bicyclique a été également obtenue par chauffage classique de **89** en présence de fer(III).¹⁷⁵

¹⁷⁴ I. A. Smellie, S. Bhakta, E. Sim, A. J. Fairbanks, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, *5*, 2257-2266.

¹⁷⁵ P.-M. Åberg, B. Ernst, *Acta Chem. Scand.* **1994**, *48*, 228-233.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes



Mécanisme:

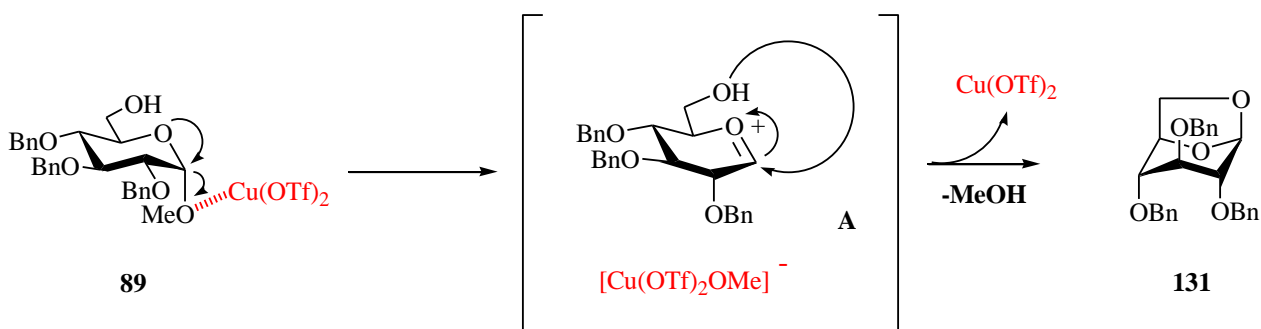


Schéma 86

Ce produit résulterait de l'attaque intramoléculaire de l'alcool primaire sur le carbone anomère de l'oxycarbénium, intermédiaire résultant de l'activation du groupement méthoxy par le triflate de cuivre(II).

La formation de 1,6-anhydro est également observée lorsque que la réaction est conduite avec le composé **122** (Schéma 87).

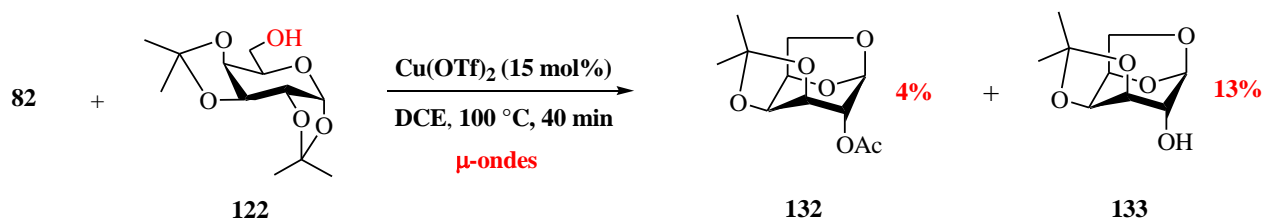


Schéma 87

Dans ces conditions, deux composés sont isolés avec des rendements faibles. Ils résultent de la succession de deux réactions : l'hydrolyse de l'acétal cyclique 1,2 suivie de la formation du 1,6-anhydro selon le même type de mécanisme que celui proposé dans le schéma 86. La formation du produit acétylé provient, quant à lui, d'une réaction ultérieure de transestérification avec les groupements acétates du donneur. En effet, nous observons des réactions de désacétylation du composé **82**.

Ces deux derniers résultats démontrent que le triflate de cuivre(II) active, dans notre cas, préférentiellement les accepteurs de glycosyle armés que la *N*-acétylglucosamine peracétylée α .

En conclusion, les réactions de glycosylation sous activation micro-ondes impliquant la *N*-acétylglucosamine peracétylée α , catalysées par le triflate de cuivre(II), se révèle efficace seulement en présence d'alcools aliphatiques et ne peut pas être étendue à la synthèse d'oligosaccharides. A notre connaissance, c'est le premier exemple d'activation par les micro-ondes de dérivés de la *N*-acétylglucosamine peracétylée α . Il est également important de noter que les produits de glycosylation possèdent une configuration α et ce malgré la présence de l'acétamide en position 2.

III.E.3. Résultats avec les dérivés soufrés

La présence de groupements thio-alkyle ou aryle offre une protection temporaire de la position anomérique intéressante, car ils peuvent facilement être activés pour conduire à la synthèse d'oligosaccharides.¹⁷⁶ Un exemple simplifié de glycosylation itérative avec les thioglycosides est représenté dans le schéma 88.¹⁷⁷

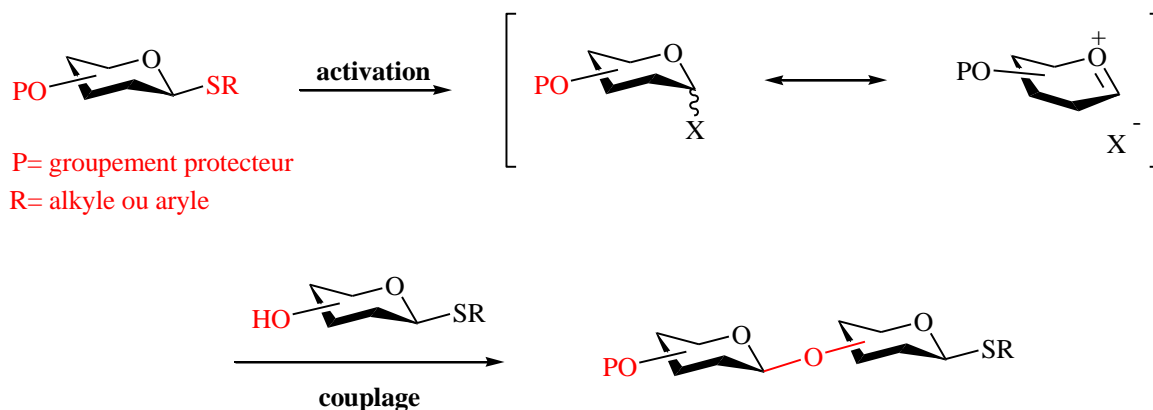


Schéma 88

L'étape d'activation peut être effectuée par différents types d'activateurs, comme la combinaison *N*-iodosuccinimide (NIS)-acide trifluorométhanesulfonique (TfOH), le trifluorométhanesulfonate de méthyle (MeOTf), le triflate de phénylsélényle (PhSeOTf), le triflate de diméthylthiométhylsulfonium (DMTST) ou l'association diphénylsulfoxyde-Tf₂O (Ph₂SO-Tf₂O).¹⁷⁸

La synthèse de thioglycosides par notre approche micro-ondes paraît attractive au vu de leur importance en chimie des sucres. Trois accepteurs soufrés ont été utilisés (Tableau 16).

¹⁷⁶ P. Fügedi, P. Garegg, H. Lönn, T. Norberg, *Glycoconjugate J.* **1987**, *4*, 97-108.

¹⁷⁷ S. Yamago, T. Yamada, T. Maruyama, J.-i. Yoshida, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 2145-2148.

¹⁷⁸ Pour une revue, voir: J. D. C. Codee, R. E. J. N. Litjens, L. J. van den Bos, H. S. Overkleeft, G. A. van der Marel, *Chem. Soc. Rev.* **2005**, *34*, 769-782.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

entrée	RSH	produit	α/β	Rdt (%)
1		134	2.1/1	53
2		135	1/6	37
3		136	1/2.6	40

Tableau 16

Les rendements sont acceptables et varient de 37 à 53%. Cependant les rapports diastéréoisomériques sont plus faibles que ceux observés en présence de leurs analogues oxygénés.

III.F. Mécanisme de la réaction de glycosylation

Afin de proposer un mécanisme, quelques expériences complémentaires ont été réalisées.

L'activation micro-ondes, dans les mêmes conditions, du glucose peracétylé de configuration α n'a pas conduit aux produits de glycosylation désirés. Seul le produit de départ a été récupéré. Ce résultat indique clairement que la fonction acétamide joue un rôle important dans la chélation avec le promoteur.

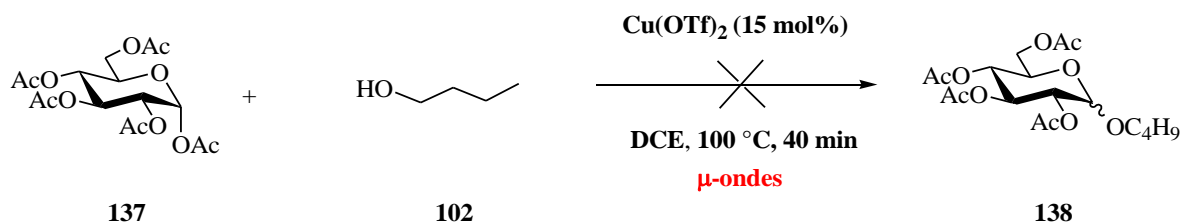


Schéma 89

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

De plus, d'un point de vue expérimental, un suivi de la réaction par chromatographie sur couche mince (CCM) révèle, dès le début de la réaction, la formation du produit β -glycosylé qui ensuite s'isomérise en anomère α . Nous n'avons jamais observé la formation de l'oxazoline et ce même au début de la réaction. La formation de cette espèce est plus difficile dans notre cas que pour la *N*-acétylglucosamine α car les groupements acétamido et acétate ont une relation 1,2-cis.

Afin de vérifier que le triflate de cuivre(II) pouvait promouvoir la réaction d'anomérisation, le produit de β -glycosylation **84** est chauffé sous irradiation micro-ondes en présence de 20 mol% de $\text{Cu}(\text{OTf})_2$. A la fin de la réaction, un mélange de glycosides est isolé avec un rendement de 35% dans un rapport $\alpha/\beta= 3.4/1$.

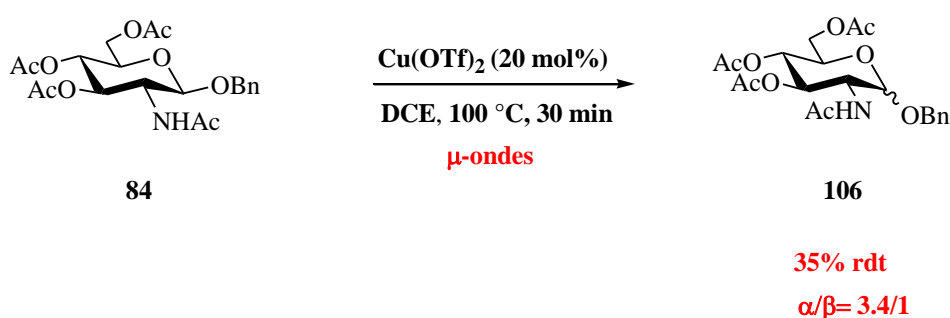
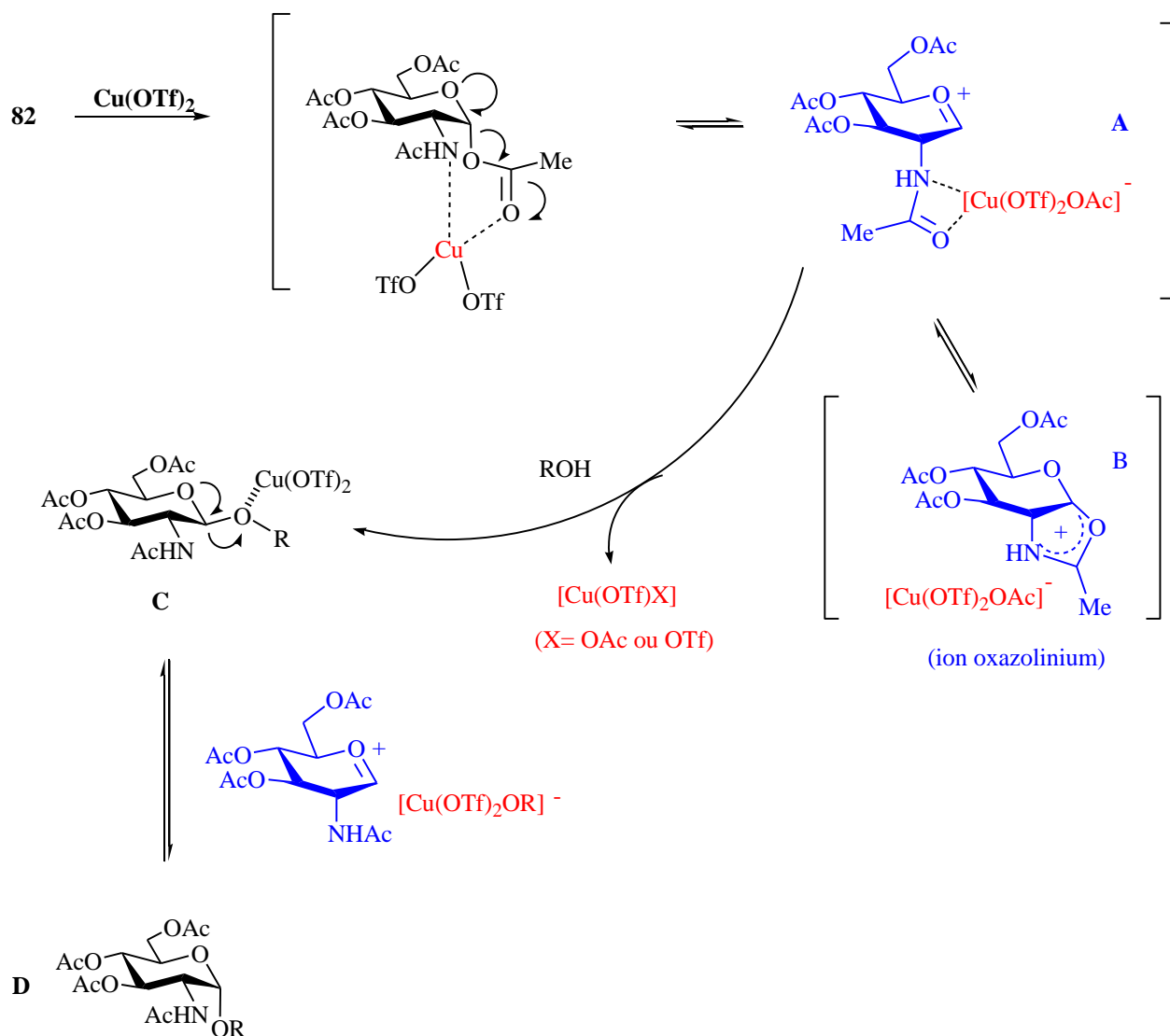


Schéma 90

La réaction de glycosylation entre la *N*-acétylglucosamine peracétylée α et le *n*-butanol **102** a été également réalisée en présence de 30 mol% d'acide triflique ($\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$), sous assistance des micro-ondes pendant 40 min. Aucun produit de glycosylation n'a été observé et seuls le produit de départ et des produits de désacétylation ont été isolés. Nous pouvons donc supposer que, même si le triflate de cuivre(II) peut relarguer de l'acide triflique, celui ne peut pas catalyser la réaction. Le triflate de cuivre(II) est donc bien le promoteur de la réaction.

Suite à ces résultats, nous proposons le mécanisme suivant en prenant un alcool comme entité nucléophile:



produit thermodynamique

Schéma 91

Le mécanisme est semblable à celui proposé par Beau et *al.*¹⁶² Dans un premier temps, l'atome de cuivre de l'acide de Lewis serait chélaté à l'oxygène du groupement acétate anomérique et à l'azote de la fonction acétamide présent sur la position C-2. L'augmentation de l'électrophilie du groupement acétate fait de lui un bon groupe partant, qui est accentué par la délocalisation du doublet non liant de l'oxygène endocyclique. Cela a pour conséquence la formation de l'ion oxycarbénium sous forme d'une paire d'ions **A**, probablement en équilibre avec l'ion oxazolinium **B**. A ce stade, le nucléophile, présent dans le milieu, peut attaquer les deux intermédiaires **A** ou **B**. Il est très difficile de déterminer quel intermédiaire sera préférentiellement attaqué. Cependant, l'attaque du nucléophile sur l'oxazolinium **B** ne peut se faire que sur la face β conduisant aux produits de glycosylation β . Nous pensons également que l'attaque du nucléophile sur l'intermédiaire **A** s'effectue sur la même face due à l'encombrement du catalyseur complexé à la fonction acétamide. Dans les deux cas, les glycosides de configuration

β sont formés. Le $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ se complexe de nouveau à l'oxygène exocyclique de **C** facilitant la formation d'un intermédiaire oxycarbénium qui est piégé par sa face α pour donner le produit thermodynamiquement le plus stable. On ne peut cependant pas exclure que l'acide acétique formé intervienne dans l'étape d'anomérisation, mais il est connu dans la littérature, que des acides de Lewis, comme le chlorure d'étain (SnCl_4)¹⁷⁹ ou le chlorure de fer (FeCl_3),¹⁸⁰ permettent d'initier ce type d'isomérisation sous chauffage classique.

III.G. Etudes des réactions de glycosylation impliquant d'autres sucres aminés

Jusqu'à présent, toutes les réactions de glycosylation testées ont été réalisées avec le donneur **82**. Nous avons voulu étendre notre activation micro-ondes à d'autres dérivés aminés tels que la galactosamine et le chitiobiose.

III.G.1. Avec la *N*-acétylgalactosamine

La galactosamine protégée **140** est synthétisée par une réaction de peracétylation du produit commercial **139**.¹⁸¹

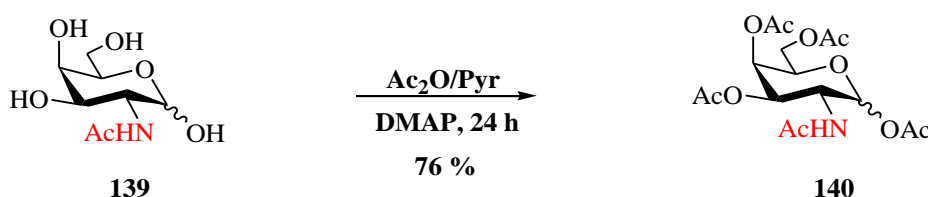


Schéma 92

Le composé **140** est isolé avec un rendement de 76% sous la forme des 2 anomères dont le rapport est de $\alpha/\beta = 9/1$. Afin d'obtenir uniquement l'anomère α , pour une comparaison avec son analogue glucosamine, une recristallisation dans AcOEt a été réalisée.¹⁸² Malheureusement, dans nos mains, l'anomère α pur n'a jamais pu être obtenu. Nous avons cependant réussi à avoir un mélange fortement enrichi contenant 96% d'anomère α et 4% d'anomère β . Ce mélange d'isomères est utilisé comme donneur dans les réactions avec le *n*-butanol **102** et le (+)-menthol (Tableau 17).

¹⁷⁹ a) W. Pilgrim, P. V. Murphy, *J. Org. Chem.* **2010**, 75, 6747-6755; b) R. R. Schmidt, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1986**, 25, 212-235.

¹⁸⁰ a) S. K. Chatterjee, P. Nuhn, *Chem. Commun.* **1998**, 1729-1780; b) G. Wei, X. Lv, Y. Du, *Carbohydr. Res.* **2008**, 343, 3096-3099.

¹⁸¹ D. Chaplin, D. H. G. Crout, S. Bornemann, D. W. Hutchinson, R. Khan, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1992**, 235-237.

¹⁸² T. Mikeska, M. Nieger, H. Mansikkamäki, J. Daniels, T. Kolter, *Carbohydr. Res.* **2003**, 338, 2119-2128.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

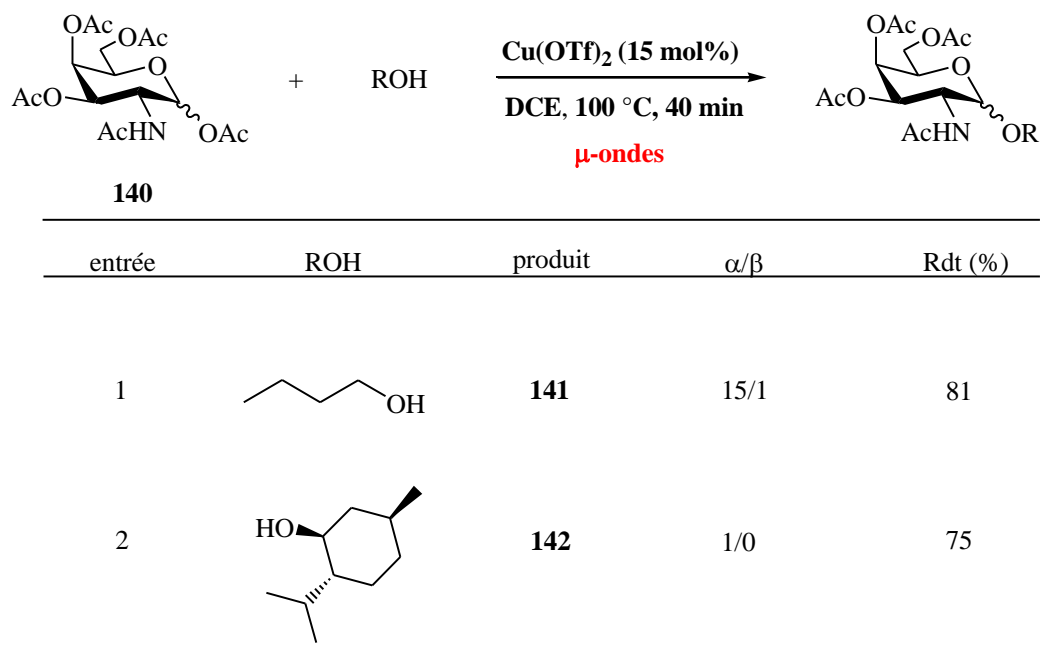


Tableau 17

Comme précédemment, l'accepteur est utilisé en excès (4 éq.). Dans les deux cas, les rendements obtenus sont élevés comme les rapports diastéréoisomériques. Par comparaison avec la glucosamine **82**, le rendement de la réaction de glycosylation en présence de butanol passe de 69% à 81%. Les rapports diastéréoisomériques n'ont pas changé et sont du même ordre de grandeur quels que soient les accepteurs utilisés.

III.G.2. Avec le chitobiose

A notre connaissance, il n'existe aucune étude de réaction de glycosylation par micro-ondes impliquant un dérivé du chitobiose peracétylé **78**. Ce composé est issu de la réaction d'acétylse de la chitine.

Nous avons, dans un premier temps, appliqué les conditions optimisées pour le donneur **82** en utilisant comme accepteur, le 4-penténol, accepteur conduisant aux meilleurs résultats dans les réactions de glycosylation avec **82** (entrée 6, Tableau 15). Après 40 min de chauffage par micro-ondes, le produit de glycosylation **143** est obtenu avec un faible rendement de 17%. Il est important de noter que même si le rendement en produit de glycosylation est faible, seul l'anomère α est formé (Schéma 93).

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

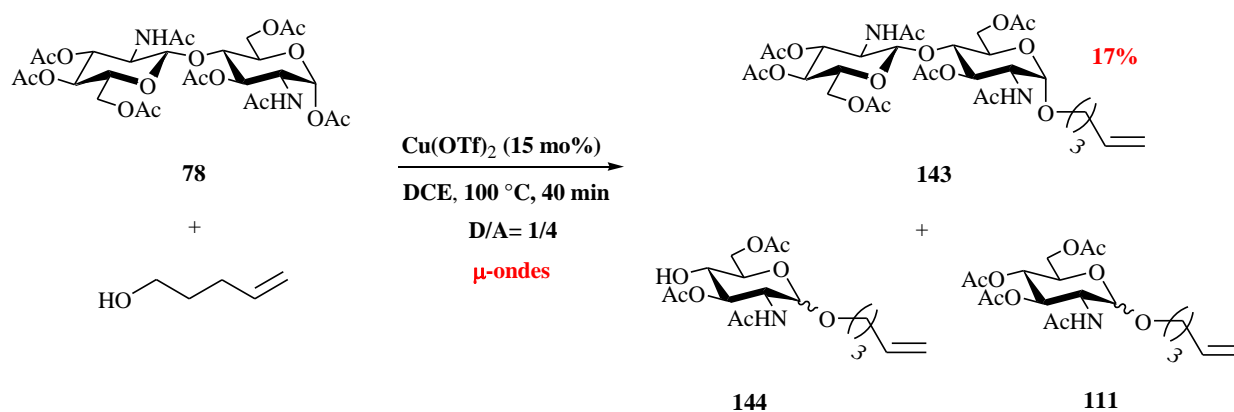


Schéma 93

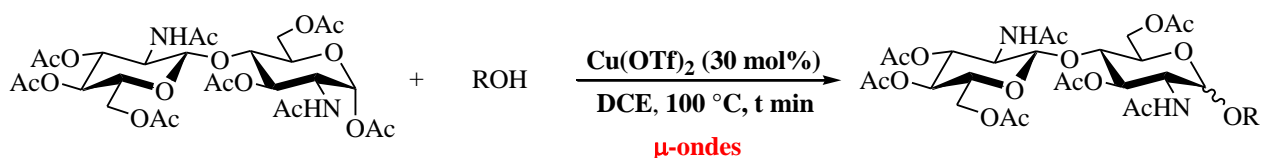
Les sous-produits de la réaction sont les monomères de la *N*-acétylglucosamine glycosylée peracétylée et mono-désacétylée **111** et **144**. Ils résultent de l'activation de l'oxygène de la liaison β -1,4 (c'est à dire que le triflate de cuivre se complexe à la fonction acétamide du sucre non-réducteur) des composés **78** et **143**, respectivement.

Une analyse plus attentive de la réaction, en fonction du temps, par CCM révèle la formation progressive de l'anomère β de **143** qui, s'isomérisse pour donner l'anomère α . Ces observations indiquent que la réaction de glycosylation de **78** transite par le même mécanisme que celui proposé pour le donneur **82**.

Le faible rendement de **143** ainsi que la formation d'une multitude de sous-produits dans le milieu réactionnel nous a conduit à optimiser les conditions opérationnelles. Les meilleures conditions que nous avons obtenues sont les suivantes : 30 mol% de Cu(OTf)_2 et 20 minutes de réaction. Ces nouvelles conditions ont permis de doubler le rendement en produit **143** (31%), obtenu sous la forme d'un mélange quasi-équimolaire d'anomères ($\alpha/\beta = 1/0.8$).

Différents accepteurs ont été testés et les résultats optimisés sont représentés ci-dessous (Tableau 18).

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes



78

entrée	ROH	produit	t (min)	α/β	Rdt (%)
1		145	60	1.1/1	42
2		146	40	1/0	46
3		147	105	1/0	14
4		148	105	12/1	35

Tableau 18

Pour chaque accepteur, il a été nécessaire d'adapter les temps réactionnels grâce à un suivi par chromatographie sur couche mince. Les rendements en produits de glycosylation sont acceptables pour un dimère et varient de 14 à 35%. Il est important de noter que les rapports diastéréoisomériques sont nettement en faveur de l'anomère α excepté pour le butanol.

III.H. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu démontrer que l'activation sous micro-ondes permettait de réaliser des réactions de glycosylation impliquant des donneurs considérés comme peu réactifs tels que des dérivés peracétylés de la glucosamine, de la galactosamine ou du chitobiose de configuration α . Ces structures peuvent être activées par des acides de Lewis mais des temps réactionnels longs ou des quantités importantes de promoteur (stoechiométriques) sont nécessaires. A notre connaissance, c'est le seul exemple d'activation non conventionnelle de ce type de structure. De plus, les réactions de glycosylation sont catalysées par une quantité catalytique de $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ et acceptent de nombreux accepteurs, comme les alcools, thiols et phénol. Par contre, les réactions impliquant un dérivé glycosidique comme accepteur afin d'accéder à des oligosaccharides, se sont révélées infructueuses. Nous avons montré que le mécanisme de la réaction transitait par la formation de β -glycosides qui s'anomérisaient *in situ* en présence de l'acide de Lewis.

Réactions de glycosylation par activation micro-ondes

Dans le cas de *N*-acétylglucosamine ou *N*-acétylgalactosamine peracétylée, de bons rendements et des hauts rapports diastéréoisomériques ont été obtenus avec les accepteurs thiol et alcool. Les conditions optimisées pour cette réaction sont les suivantes: 40 min de chauffage sous micro-ondes à une température de 100 °C dans le dichloroéthane comme solvant en présence 15 mol% de Cu(OTf)₂.

La réaction en présence du chitobiose peracétylé s'est révélée plus délicate à mettre au point dû à la formation de produits secondaires, notamment des monomères glycosylés, contribuant ainsi à une diminution du rendement. Pour résoudre ce problème, la quantité de catalyseur et le temps de réaction ont été augmentés. Ces nouvelles conditions nous ont permis d'isoler les produits désirés avec des rendements acceptables.

Cette étude nous a donc permis de valoriser les produits d'acétolyse de la chitine. Les produits de glycosylation obtenus peuvent avoir de nombreuses applications comme par exemple des précurseurs pour la synthèse d'organocatalyseurs chiraux, utiles pour effectuer des réactions asymétriques en chimie organique. Récemment, des dérivés de glucosamine ont été évalués dans les réactions asymétriques en tant qu'organocatalyseurs.

CHAPITRE III

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

Dans ce troisième et dernier chapitre, nous détaillerons les résultats que nous avons obtenus en utilisant la glucosamine et les oligomères de chitosane comme organocatalyseurs chiraux dans les réactions classiques de la chimie organique telles que les réactions d'aldolisation, de Michael et d'Henry.

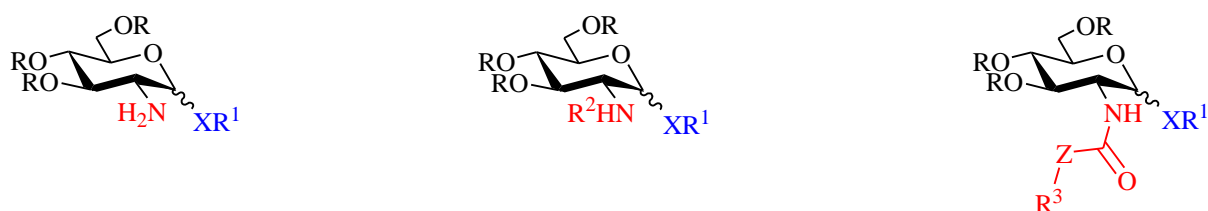
I. Spécificité de la glucosamine comme catalyseur chiral

Les sucres, par nature, sont des molécules très polaires et hautement fonctionnalisées portant plusieurs centres stéréogènes adjacents. Ces caractéristiques rendent les sucres attractifs comme précurseurs de catalyseurs chiraux. Plus particulièrement, la glucosamine est une molécule chirale intéressante pour réaliser des réactions organocatalysées pour les raisons suivantes :

- sa fonction amine primaire, qui peut être substituée ou non, peut être impliquée dans une activation de type énamine ou iminium comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.

- il est possible de transformer la fonction amine en fonctions amide et urée ou leurs analogues soufrés (thioamide et thiourée) afin d'obtenir des organocatalyseurs capables d'initier des réactions chimiques par activation par liaisons hydrogène.

Le schéma 94 présente une série de dérivés de la glucosamine capables, au moins théoriquement, de catalyser des transformations chimiques d'une manière énantiosélective.



X= O, S

Z= N, C

R= alkyle, benzyle, silyle, acyle

R¹= silyle, benzyle, alkyle, aryle

R²= alkyle, benzyle

R³= alkyle, aryle

Schéma 94

De plus, la présence des fonctions hydroxyles sur la glucosamine confère à cette dernière une grande "flexibilité" de solubilité dans les solvants. En effet, la présence des hydroxyles libres fait de la molécule une espèce hautement polaire qui se dissout dans les solvants polaires tels que l'eau. A l'inverse, la protection d'une partie ou de la totalité de ces mêmes groupements conduit à une meilleure solubilité dans les solvants organiques.

II. L'organocatalyse par des dérivés de la D-glucosamine

Cette partie sera consacrée à la description des synthèses de catalyseurs dérivés de la D-glucosamine et ses applications en catalyse énantiosélective. Nous nous intéresserons d'abord aux catalyseurs possédant une fonction amine primaire avant d'aborder les catalyseurs dont la fonction amine est substituée.

II.A. Organocatalyseurs possédant une fonction amine primaire

II.A.1. Travaux antérieurs

Les exemples d'organocatalyse par les dérivés de la D-glucosamine possédant une fonction amine primaire sont relativement rares dans la littérature. Nous avons déjà mentionné au Chapitre 1 un exemple d'aldolisation énantiosélective réalisée par la D-glucosamine.⁷³ Il s'agit du cas le plus simple d'organocatalyseur. Cependant, l'utilisation d'un tel sucre réducteur, qui existe sous la forme de deux anomères en équilibre via une forme ouverte, ne permet pas de déterminer le rôle de l'anomérisation dans l'énantiosélectivité de la réaction (Schéma 95).

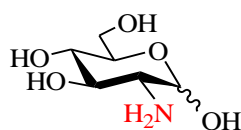
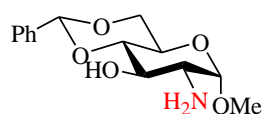
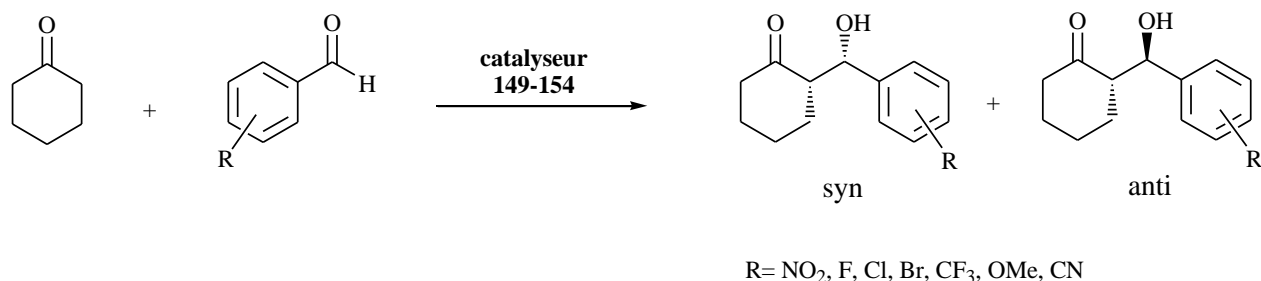
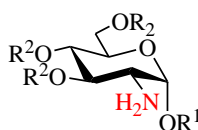


Schéma 95

Au commencement de ma thèse, des organocatalyseurs, dont la position anomérique est protégée sous forme d'acétal, ont été décrits par Peddinti et coll.¹⁸³ Dans cette étude, les auteurs ont étudié la réactivité d'une série de structures dérivées de la D-glucosamine et leurs inductions asymétriques dans les réactions d'aldolisation énantiosélectives (Schéma 96).



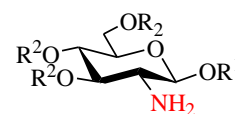
149



150: R¹ = Me, R² = Bn

151: R¹ = Me, R² = 4-(^tButyl)benzyl

152: R¹ = R² = Bn



153: R¹ = Me, R² = Bn

154: R¹ = R² = Bn

Schéma 96

¹⁸³ J. Agarwal, R. K. Peddinti, *J. Org. Chem.* **2011**, 76, 3502-3505.

Les résultats montrent que le meilleur catalyseur en terme de sélectivité et de réactivité est la structure **149**. En présence de 20 mol% de catalyseur, la cyclohexanone réagit avec l'aldéhyde aromatique substitué par des groupements électroattracteurs ou donneurs pour conduire aux produits d'aldolisation avec de très bons rendements (allant jusqu'à 99%) et d'excellents excès énantiomériques (>99% *ee* dans le cas où R= 3-NO₂). Les rapports diastéréoisomériques *syn/anti* restent cependant modérés.

II.A.2. Utilisation de dérivés α -O-méthyl-2-aminoglucopyranosides

Nous avons voulu réitérer une de ces expériences avant de pouvoir étudier la réactivité des produits issus de l'acétylolyse de la chitine. Nous avons choisi de synthétiser le catalyseur **149** qui s'était révélé le plus performant.

II.A.2.a. Synthèse

L'organocatalyseur **149** est synthétisé en 3 étapes en partant de la *N*-acétylglucosamine **155** commerciale.¹⁸⁴

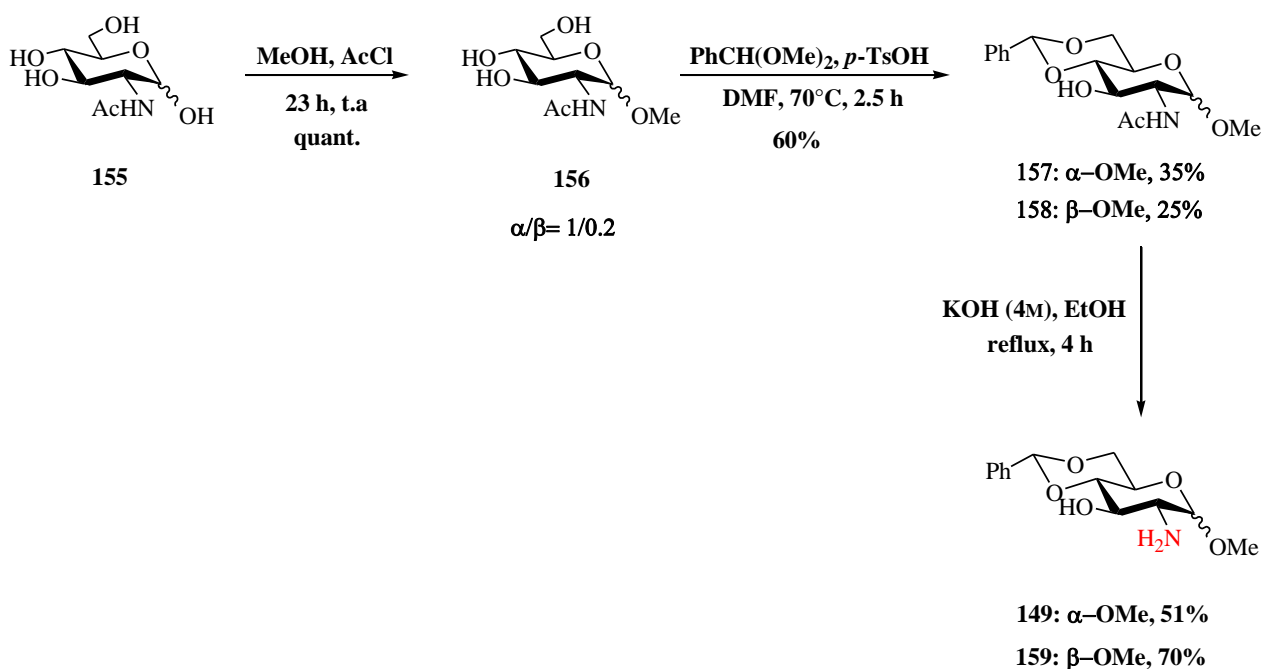


Schéma 97

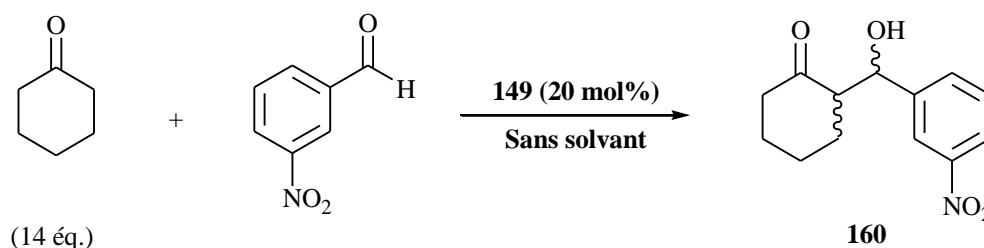
Une glycosylation de Fischer dans le méthanol conduit au méthylglycoside **156** isolé sous la forme d'un mélange deux anomères dans un rapport de 5 pour 1 en faveur de l'isomère α . La protection des hydroxyles en position 4 et 6 sous la forme d'un benzylidène est réalisée par réaction avec le benzaldéhyde diméthylacétal en présence d'une quantité catalytique d'acide *para*-toluènesulfonique. A ce stade, les deux anomères peuvent être séparés par chromatographie

¹⁸⁴ D. P. G. Emmerson, R. Villard, C. Mugnaini, A. Batsanov, J. A. K. Howard, W. P. Hems, R. P. Tooze, B. G. Davis, *Org. Biomol. Chem.* **2003**, *1*, 3826-3838.

sur gel de silice en utilisant un appareil automatisé de type CombiFlash®. Les anomères α et β ont été isolés avec des rendements respectifs de 35% et 25%. La dernière étape de déprotection de la fonction amine est réalisée par de la potasse dans l'éthanol pour conduire aux produits désirés avec des rendements acceptables. Malgré plusieurs recristallisations dans différents solvants, une légère coloration jaune persiste, qui peut être due à la présence d'impuretés. Cependant, les analyses spectroscopiques par RMN ^1H et ^{13}C ne montrent aucun autre produit. Nous pouvons donc en déduire que le pourcentage de ces impuretés n'excède pas 5%, seuil de sensibilité de la technique.

II.A.2.b. Réaction d'aldolisation

Le composé de configuration α **149** a été évalué pour son induction asymétrique dans la réaction d'aldolisation entre la cyclohexanone et le 3-nitrobenzaldéhyde. Nos résultats sont représentés dans le tableau 20 et comparés à ceux obtenus par Peddinti¹⁸³ (Tableau 19).



entrée	t (h)	T °C	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	24	-40	1.9/1 (1.4/1) ^d	30/66 (16/94)	86 (98) ^e
2	24	t.a	1.5/1	14/20	80
3	16	-20	2.3/1 (0.8/1)	33/39 (33/99)	92 (96)
4	8	0	1.3/1 (1.9/1)	1/6 (30/60)	86 (98)
5 ^f	8	0	1.1/1	7/3	65

^a Déterminé par RMN ^1H , ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts des produits purs isolés, ^{d,e} Valeurs entre parenthèses prise de la ref 183, ^f Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

Tableau 19

Toutes les réactions ont été réalisées dans la cyclohexanone qui joue le rôle de solvant et de réactif, en présence de 20 mol% de catalyseur, conditions utilisées par Peddinti et *coll.* Les rapports diastéréoisomériques ont été déterminés par analyse spectroscopique du proton et plus

particulièrement par l'intégration des protons en alpha de l'alcool qui sont bien différenciés. Les excès énantiomériques ont été déterminés par une analyse par HPLC chirale en accord avec les conditions de la littérature. Il est apparu que, pour la plupart des expériences que nous avons réalisées, les conversions et rapports diastéréoisomériques sont du même ordre de grandeur que les résultats de Peddinti, indiqués en rouge (entrées 1,3 et 4). Par contre, nous observons une très grande différence au niveau des excès énantiomériques, les nôtres étant toujours plus faibles. Il est important de mentionner que lorsque la température de réaction est de -40 °C, le milieu est solide car le point de fusion de la cyclohexanone est de -32 °C. L'augmentation de la température n'a pas d'effet sur la conversion mais, comme on pouvait le prévoir, les excès énantiomériques sont plus faibles (entrées 1 et 2, Tableau 19). Les résultats montrent encore que l'ajout d'un co-catalyseur acide (acide benzoïque), dans le but d'accélérer la vitesse de la réaction, conduit à une légère chute de rendement (entrées 4 et 5, Tableau 19).

Peddinti et *coll.* ont proposé un modèle dans lequel la fonction alcool sur la position C-3 de la glucosamine pouvait jouer un rôle important dans l'induction asymétrique grâce à la formation d'une liaison hydrogène lors de l'état de transition. Afin de vérifier cette hypothèse, cette fonction a été protégée sous forme d'éther silylé. Pour des raisons de stabilité chimique, le groupement *tert*-butyldiméthylsilyle (TBS) a été choisi. L'organocatalyseur **161** est obtenu avec un bon rendement de 84% par traitement par le chlorure de *tert*-butyldiméthylsilyle en présence de *N,N*-diisopropyléthylamine dans le dichlorométhane (Schéma 98).

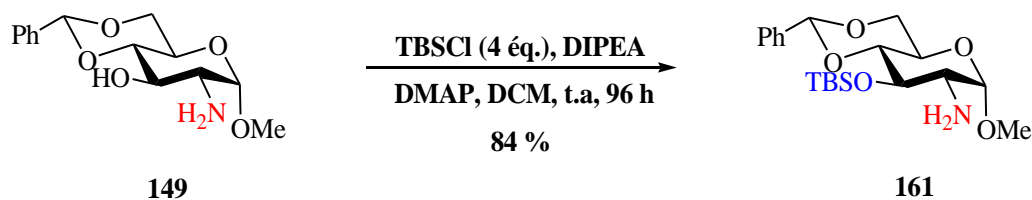
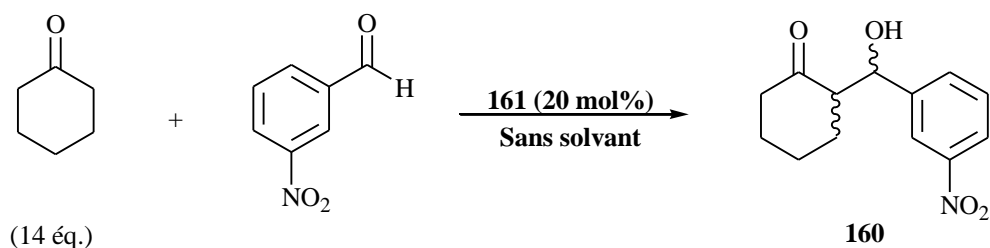


Schéma 98



entrée	t (h)	T °C	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	24	t.a	1/2	7/16	48
2 ^d	24	t.a	1.5/1	3/2	76
3	8	0	1/4.7	27/24	25

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts des produits purs isolés,

^d Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

Tableau 20

D'après ces résultats, il apparaît évident que la fonction hydroxyle sur le C-3 joue un rôle important dans la sélectivité de la réaction. En effet, le rendement de la réaction d'aldolisation à température ambiante pour 24 h n'est que de 48% (entrée 1, Tableau 20) comparé à 80% pour le catalyseur **149** (entrée 2, Tableau 19). Plus important, alors qu'avec le catalyseur possédant une fonction alcool en 3 le diastéréoisomère *syn* est prépondérant, nous observons une inversion de ce rapport en faveur du diastéréoisomère *anti* en présence du catalyseur silylé. La diminution de la température permet d'augmenter les rapports diastéréoisomériques et les excès énantiomériques (entrées 1 et 3). L'addition d'un co-catalyseur, l'acide benzoïque, permet d'accroître le rendement mais conduit à une inversion du rapport diastéréoisomérique (entrées 1 et 2).

Les résultats obtenus ci-dessus semblent indiquer que la structure **149** joue le rôle d'un organocatalyseur bifonctionnel comme la (*S*)-proline. La fonction amine primaire sur le C-2 de **149** réagit avec la cyclohexanone pour former une énamine, intermédiaire nucléophile de la réaction. L'établissement d'une liaison hydrogène entre l'hydroxyle en C-3 et le carbonyle du 3-nitrobenzaldéhyde augmente l'électrophilie de ce dernier vis-à-vis d'une attaque nucléophile de l'énamine et favorise surtout la formation d'un état de transition qui conduit au diastéréoisomère *syn*. Un état de transition plausible est présenté dans le schéma 99.

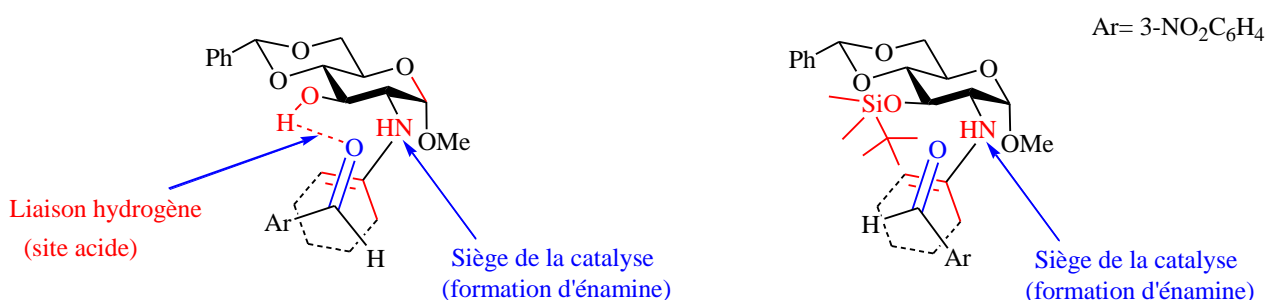


Schéma 99

En absence de cette liaison hydrogène, le groupement aryle se positionne à l'opposé du groupement volumineux silylé pour minimiser les interactions stériques ce qui favorise la formation du diastéréoisomère *anti*.

II.A.2.c. Réaction de Michael

La meilleure activité observée pour l'organocatalyseur **149** nous a conduit à évaluer sa réactivité dans la réaction de Michael. Nous avons choisi le nitrostyrène **38** comme accepteur et le propanal comme donneur de Michael. Malheureusement, aucun produit d'addition n'a été observé en présence de 10 mol% de **149** et d'un grand excès de propanal (100 éq.).

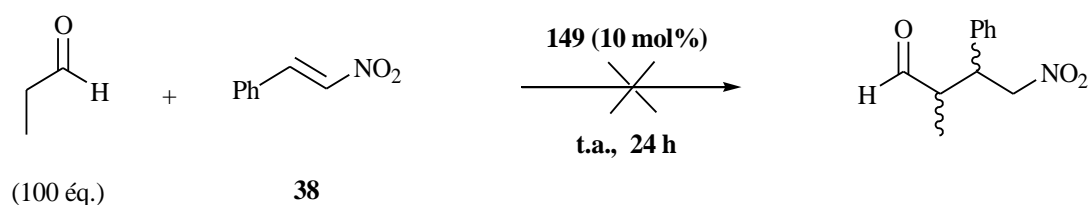


Schéma 100

Découragés par ces résultats, nous avons préféré nous concentrer sur les réactions d'aldolisation.

II.A.3. Utilisation d'un dérivé 2-aminoglucopyranose

Comme nous venons de le voir, la présence d'une liaison hydrogène paraît importante dans l'obtention des produits d'aldolisation. Nous nous sommes demandés si la présence d'un groupement hydroxyle en position anomérique permettrait d'obtenir des résultats intéressants.

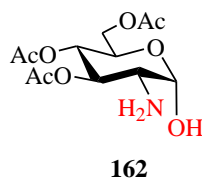


Schéma 101

II.A.3.a. Synthèses

Deux stratégies ont été envisagées pour la synthèse de ce catalyseur. La première approche repose sur la protection de la fonction acétamide de la *N*-acétylglucosamine peracétylée de configuration α , produit issu de l'acétolyse de la chitine. L'action de l'anhydride de *tert*-butyloxycarbonyle conduit au produit protégé **163** avec 82% de rendement. Un traitement à l'acétate d'hydrazine permet de déprotéger sélectivement la position anomérique et la fonction acétamide. Le carbamate **164** est isolé avec 60% de rendement.

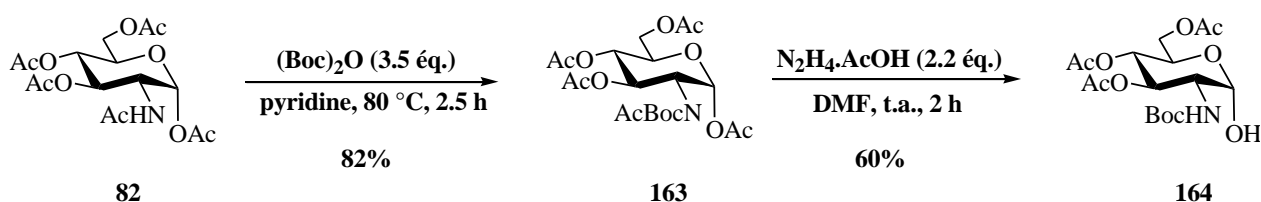


Schéma 102

La dernière étape de déprotection de la fonction amine est réalisée par l'acide trifluoroacétique (Tableau 21).

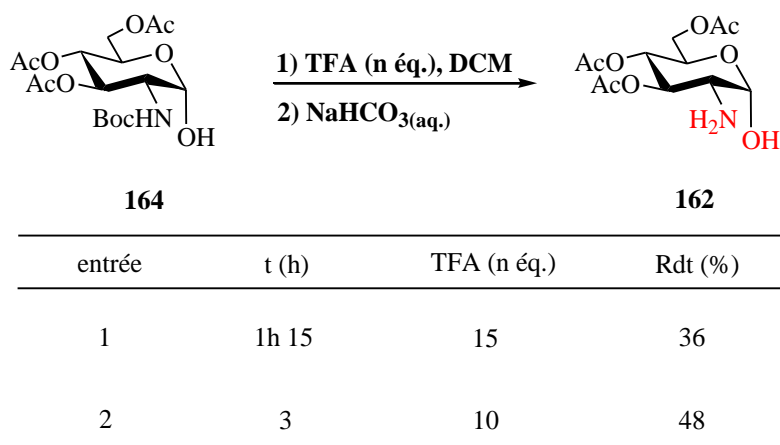


Tableau 21

Malgré un excès de réactif et un temps prolongé, le rendement n'excède pas 48%. Ces résultats nous ont poussé à trouver une voie de synthèse alternative (Schéma 103).

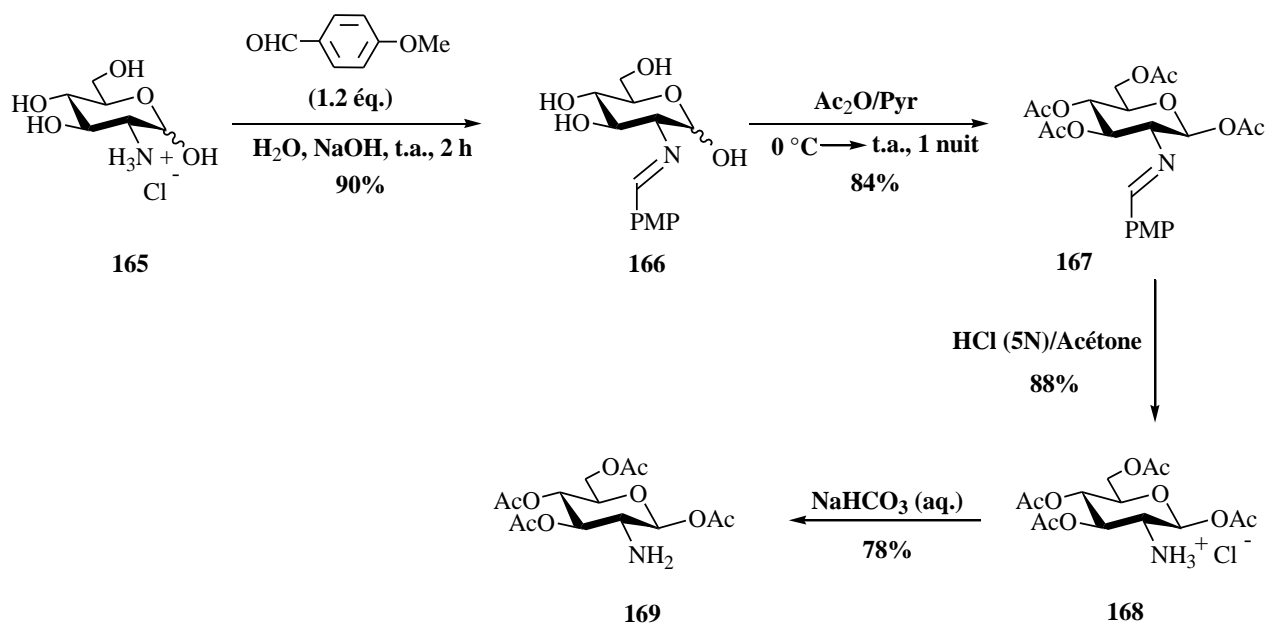
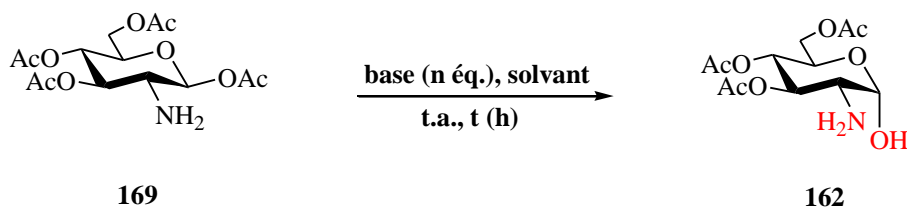


Schéma 103

Le chlorhydrate de glucosamine **165** est converti en imine **166** par action du 4-méthoxybenzaldéhyde. Une réaction de peracétylation fournit exclusivement le produit acétylé β avec 84% de rendement. L'hydrolyse de l'imine par HCl dans l'acétone suivie de la neutralisation du chlorhydrate **168**¹⁸⁵ conduit à l'amine **169**. La réaction de désacétylation de la fonction anomérique s'est avérée plus délicate et plusieurs conditions ont été testées (Tableau 22).

¹⁸⁵ H. Myszka, D. Bednarczyk, M. Najder, W. Kaca, *Carbohydr. Res.* **2003**, 338, 133-141.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane



entrée	t (h)	base (n \acute{e}q.)	solvant	Rdt (%)
1	1	N ₂ H ₅ OAc (1)	DMF	41
2	2	CH ₃ NH ₂ (1)	THF	40
3	21	CH ₃ NH ₂ (1.1)	THF	45
4	24	CH ₃ NH ₂ (1)	DCM	13
5	21	(CH ₃) ₂ NH (1.1)	THF	36
6	48	NH ₄ OH (1.1)	THF	33
7	48	BnNH ₂ (1.1)	THF	46
8	48	pipéridine (1)	THF	30

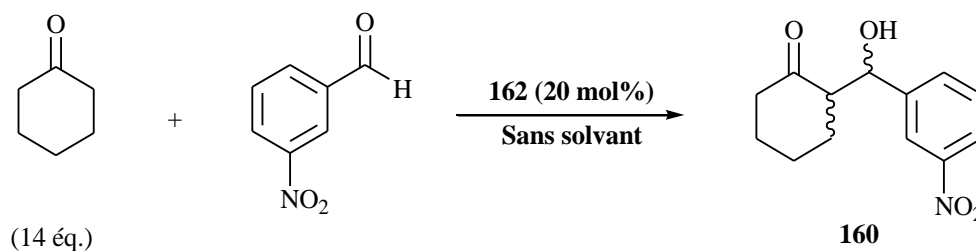
Tableau 22

Le tableau 22 montre que le meilleur rendement est obtenu avec la benzylamine (BnNH₂) comme base (entrée 7). Il faut noter, que l'organocatalyseur **162** est obtenu exclusivement sous la forme α , résultant de l'établissement d'une liaison hydrogène intramoléculaire entre le groupement hydroxyle anomérique et la fonction amine en C-2.

Même si cette seconde approche est plus longue, nous l'avons adoptée pour plusieurs raisons. Les étapes sont faciles à réaliser, ne nécessitent pas de purification sur colonne chromatographique (sauf pour la dernière étape) et peuvent être réalisées sur des quantités de l'ordre du gramme.

II.A.3.b. Réaction d'aldolisation

Les tests catalytiques utilisant ce nouveau catalyseur **162** sont présentés dans le tableau 23 ci-dessous.



entrée	t (h)	T °C	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	24	t.a.	1.5/1	12/33	10
2 ^d	24	t.a.	2.3/1	19/10	87
3	72	t.a.	1/1	26/31	59
4	48	-20	1/1.4	28/31	8

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts des produits purs isolés, ^d Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

Tableau 23

L'activité du catalyseur **162** est plus faible que celle des catalyseurs précédents. Après 24 h de réaction, seulement 10% de produit sont formés et il faut attendre 3 jours avant d'obtenir un rendement moyen de 59% (entrée 3, Tableau 23). Ce résultat peut être facilement rationalisé. La chute de rendement peut s'expliquer par la présence de groupements électroattracteurs (acétyle). De plus, la relation *cis* des substituants en position 1 et 2 favorise la formation d'une liaison hydrogène entre ces partenaires; le groupement hydroxyle n'est donc plus en capacité d'activer l'aldéhyde par l'établissement d'une liaison hydrogène. Cette hypothèse est corroborée par l'excellent rendement obtenu en présence de l'acide benzoïque comme co-catalyseur (entrée 2)

Il est intéressant de noter que le rapport diastéréoisomérique est en légère faveur de l'isomère *syn*, même sélectivité que celle du catalyseur possédant un groupement hydroxyle en position 3. Ce rapport est inversé en faveur du diastéréoisomère *anti* quand la réaction est réalisée à -20 °C. Les excès énantiomériques sont faibles et ne dépassent pas 33% pour le diastéréoisomère *anti* et 28% pour le *syn*.

II.A.4. Utilisation de dérivés de configuration β

II.A.4.a. Réaction d'aldolisation catalysée par le composé 168

Le schéma 103 montre que, notamment, l'intermédiaire **168** peut lui-même jouer le rôle d'un organocatalyseur. Nous avons voulu évaluer la réactivité de cette molécule dans la réaction d'aldolisation en tant qu'activateur par liaisons hydrogène. Ce catalyseur présente plusieurs avantages à savoir :

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

- il est soluble dans l'eau ce qui permettrait de récupérer les produits d'aldolisation et de recycler le catalyseur
- il peut servir comme donneur de proton mimant ainsi un co-catalyseur acide (activation par acide de Brønsted)
- de part sa fonction primaire, il permettrait de catalyser certaines transformations *via* une activation de type énamine.

La réaction d'aldolisation est donc réalisée dans l'eau comme solvant avec une concentration en catalyseur de 0.06 M et en présence d'un agent de transfert de phase, le chlorure de tétrabutylammonium (TBACl) (Schéma 104).

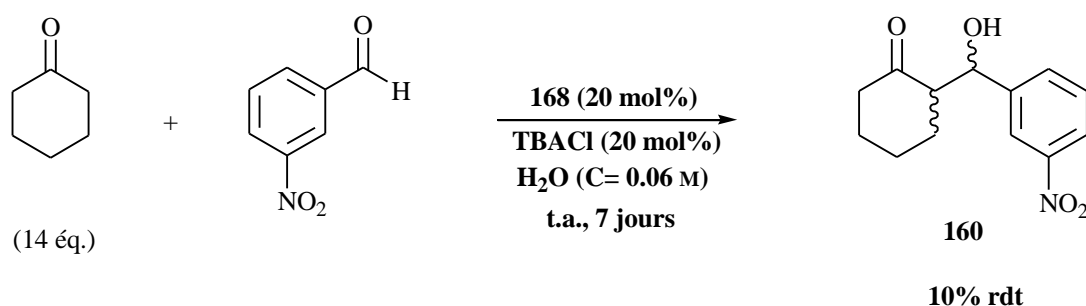


Schéma 104

Malheureusement, la réaction s'est avérée extrêmement lente qu'après 7 jours 10% de produits d'aldolisation **160** sont isolés. Les excès énantiomériques n'ont pas été déterminés et le travail avec cet organocatalyseur a été abandonné.

II.A.4.b. Synthèse du β -O-méthyl-2-aminoglucopyranoside

Nous avons vu que le catalyseur β -O-méthyl-2-aminoglucopyranoside **159** peut être formé par la même méthode que celle utilisée pour la synthèse de son anomère α **149** (Schéma 97). Cependant, la séparation de ces isomères est délicate et nous avons préféré adopter une synthèse sélective de composés β . Cette approche repose sur l'utilisation de la fonction acétamide de la *N*-acétylglucosamine comme groupement participant dans les réactions de glycosylation. La *N*-acétylglucosamine est traitée par le chlorure d'acétyle¹⁸⁶ sous atmosphère inerte pour donner le chlorure d'Horton **170** avec 71% de rendement. L'action du MeONa/MeOH¹⁸⁷ permet d'associer une réaction de substitution nucléophile à une réaction de désacétylation pour conduire sélectivement au β -méthylglucoside déprotégé **171** avec un rendement de 77%. Une réaction d'acétalation suivie de la déprotection de l'amine fournit le composé **159** avec 42% de rendement, rendement calculé pour les deux dernières étapes.

¹⁸⁶ D. Horton, *D. Org. Synth.* **1966**, 46, 1.

¹⁸⁷ L.-X. Wang, Y. C. Lee, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1996**, 581-591.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

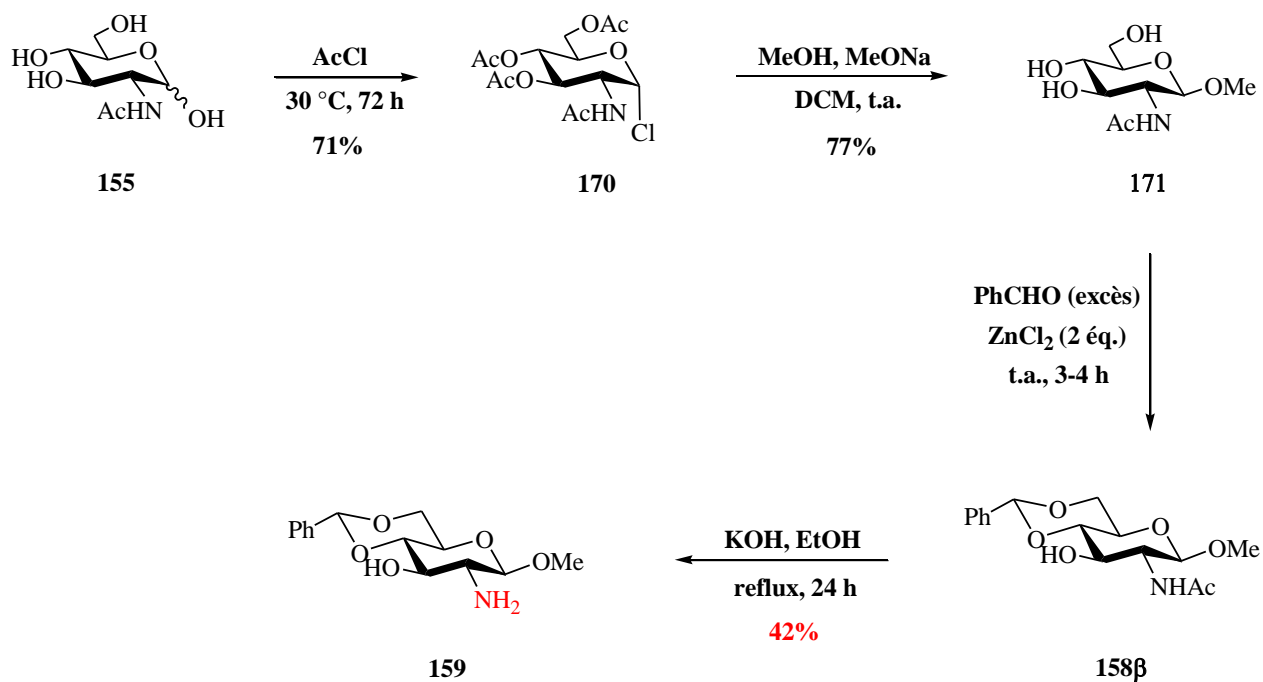
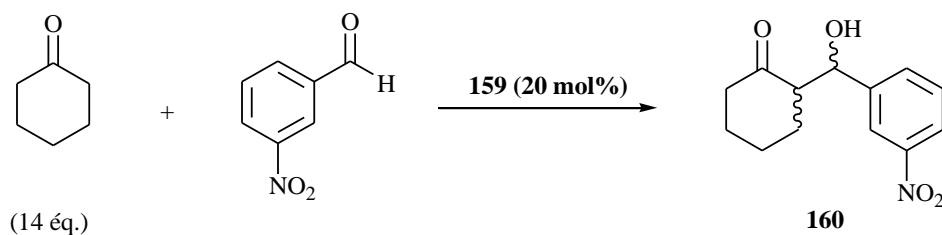


Schéma 105

II.A.4.c. Réaction d'aldolisation

Tout comme pour son analogue α **149**, une série de tests catalytiques a été réalisée en utilisant un excès de cyclohexanone (14 éq.), qui joue le rôle de réactif et de solvant en présence de 20 mol% de catalyseur **159** (Tableau 24).

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane



entrée	t (h)	T °C	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	24	-40	1/3.4	17/14	36
2	16	-20	-	-	trace
3	8	0	1/1	33/6	13
4 ^d	8	0	1.4/1	22/29	68
5 ^e	72	-20	2.5/1	38/5	54
6 ^e	48	t.a	1.5/1	22/8	60
7 ^e	4.5	t.a	2.5/1	30/20	76

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts des produits purs isolés,

^d Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

^e Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide 4-nitrobenzoïque

Tableau 24

En examinant les valeurs présentées dans le tableau 24 ci-dessus, nous pouvons tout de suite remarquer la faible réactivité de l'organocatalyseur **159** comparée à son analogue α **149**. En effet, les produits d'aldolisation sont isolés avec 36% de rendement après 24 h de réaction à -40 °C (entrée 1, Tableau 24) alors que 86% de rendement sont obtenus avec le catalyseur **149** (entrée 1, Tableau 19). De plus, la diastéréosélectivité *syn/anti*, à -40 °C, est inverse par rapport à celle observée en présence du catalyseur **149**, ce qui montre la possibilité de formation de deux états de transition différents selon l'isomérisation du centre anomère. En ce qui concerne l'énantiosélectivité, l'induction asymétrique en présence du catalyseur **149** est plus importante que celle observée avec **159**. L'excès énantiomérique pour le diastéroisomère *syn*, par exemple, a chuté de moitié de sa valeur (de 30% à 17% ee entrées 1, Tableaux 19 et 24, respectivement). Par contre, l'ajout d'un co-catalyseur acide, comme l'acide benzoïque, a permis d'augmenter significativement le rendement (entrées 4). A ce stade, plusieurs co-catalyseurs acides ont été testés. Parmi eux, l'acide 4-nitrobenzoïque, dont l'acidité est accrue par la présence du groupement électroattracteur, s'est révélé être le plus efficace. Les entrées 5, 6 et 7 du tableau 24 correspondent aux résultats de la réaction d'aldolisation réalisée en présence de 20 mol% d'acide 4-nitrobenzoïque à différentes températures et temps de réaction. A -20 °C, la réaction est

relativement lente conduisant aux adduits aldoliques avec un rendement de 54% après 72 h de réaction. La réaction conduite à température ambiante a pour effet d'accélérer la vitesse et les produits désirés sont isolés avec un rendement de 60% au bout de 48 h. Lors de cette réaction, 40 % de produit de crotonisation **173**, résultant de la déshydratation de **160**, sont également formés. Le mécanisme proposé pour la formation de ce sous-produit est présenté dans le schéma 106.

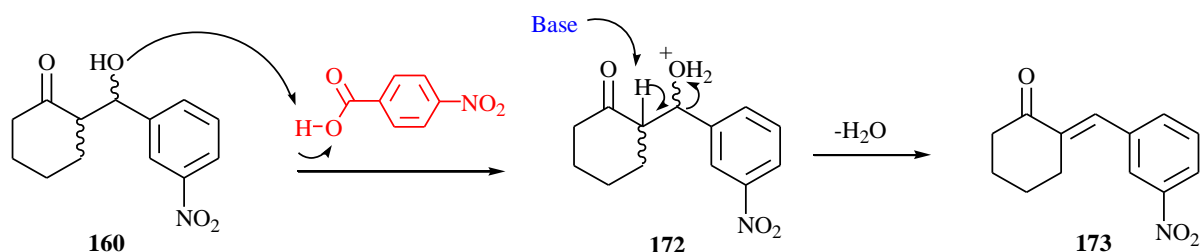


Schéma 106

Un suivi par chromatographie sur couche mince a permis d'identifier la formation du produit de crotonisation après 4.5 h. Sa formation peut-être donc facilement limitée par la neutralisation de l'acide par un excès de NaHCO₃ après 4h30 de réaction permettant ainsi d'augmenter le rendement en produit d'aldolisation à 76% (entrée 7, Tableau 24).

D'un autre côté, un cycle catalytique est proposé pour l'organocatalyse en présence d'un co-catalyseur acide (Schéma 107).

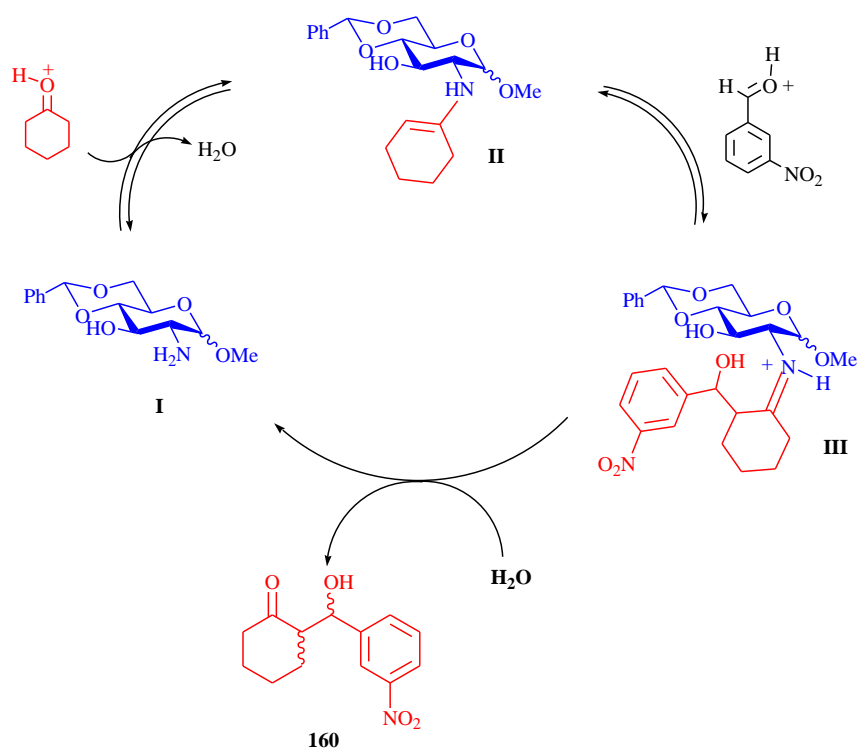


Schéma 107

Dans ce cycle catalytique, l'attaque nucléophile de l'organocatalyseur **I** sur la cyclohexanone est facilitée par la protonation de la fonction carbonyle par le co-catalyseur acide. L'énamine **II** ainsi formée, peut réagir avec l'aldéhyde, dont l'électrophilie est fortement augmentée par sa protonation, pour conduire à l'iminium **III**. Une réaction d'hydrolyse fournit le produit d'aldolisation **160** en régénérant l'organocatalyseur **I** et le co-catalyseur acide.

En général, les excès énantiomériques sont faibles et les meilleurs excès que nous avons obtenu étaient de 38% pour le diastéréoisomère *syn* (entrée 5, Tableau 24) et 29% pour l'*anti* (entrée 4, Tableau 24). Les réactions réalisées sans co-catalyseur acide prouvent que l'organocatalyseur de configuration β est moins réactif et moins stéréosélectif que son analogue α . La différence de réactivité avait été également observée par Peddiniti et *coll*¹⁸³.

II.B. Organocatalyseurs possédant une fonction amine secondaire

A notre connaissance, il n'existe pas des travaux d'organocatalyse réalisés avec la glucosamine possédant une amine secondaire. L'idée d'avoir une amine secondaire comme site catalytique sur la glucosamine réside dans le fait que l'introduction d'un groupement alkyle sur la fonction amine primaire devrait, au moins en théorie, augmenter la nucléophilie de ce site par effet inductif donneur du groupe alkyle. L'augmentation de la nucléophilie devrait se traduire par une réactivité supérieure de la fonction amine secondaire par rapport à l'amine primaire.

II.B.1. Synthèses des organocatalyseurs

Pour tester notre hypothèse, nous sommes partis de précurseurs que nous avons déjà synthétisés, les molécules **149** et **159**. A l'inverse des réactions d'alkylation, la réaction d'amination réductrice permet d'obtenir sélectivement une amine monosubstituée. Cette réaction est effectuée en présence de benzaldéhyde et d'un réducteur, le borohydrure de sodium (Schéma 108).

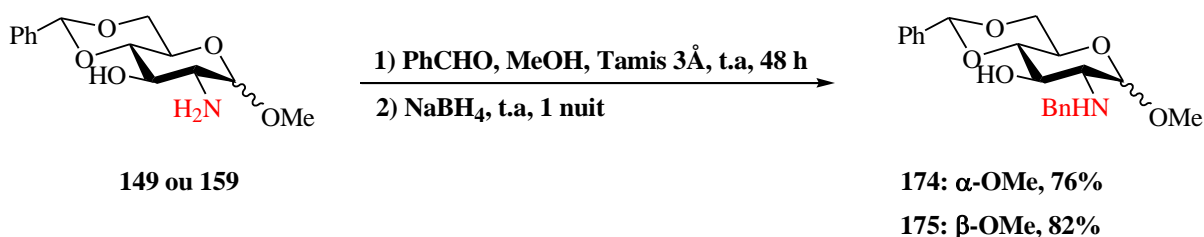


Schéma 108

Les amines secondaires **174** et **175** sont isolées avec des rendements respectifs de 76 et 82% à partir des précurseurs **159** et **149**.

Par contre, ces conditions n'ont pas permis d'obtenir les produits de condensation avec le propanal. La réaction est conduite dans le 2,2,2-trifluoroéthanol ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{OH}$)¹⁸⁸ comme solvant pour fournir le produit désiré **176** avec 33% de rendement.

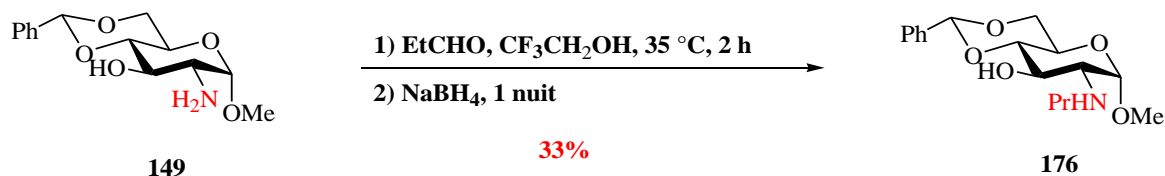
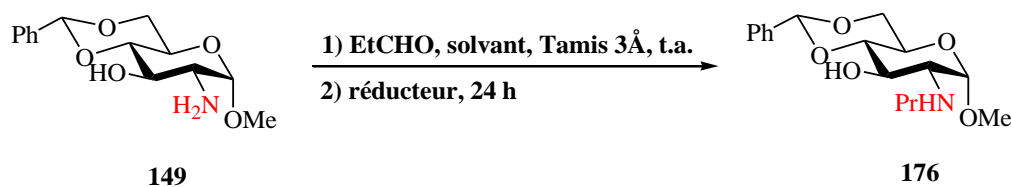


Schéma 109

Afin d'améliorer les rendements, différents solvants et réducteurs ont été testés (Tableau 25).



entrée	réducteur (n éq.)	solvant	Rdt (%)
1	$\text{NaBH}(\text{OAc})_3$ (1.5)	THF	20
2	NaBH_3CN (1)	MeOH	17
3	NaBH_3CN (1.5)	MeOH	70

Tableau 25

L'utilisation de $\text{NaBH}(\text{OAc})_3$ comme réducteur¹⁸⁹ conduit au produit alkylé avec un rendement faible (20%) et ce, même avec un équivalent de NaBH_3CN . Un excès de NaBH_3CN est nécessaire afin d'augmenter considérablement le rendement (70% entrée 3, Tableau 25).

Ces conditions optimisées sont appliquées pour la synthèse de son l'analogue β **177** (Schéma 110).

¹⁸⁸ M. Tajbakhsh, R. Hosseinzadeh, H. Alinezhad, S. Ghahari, A. Heydari, S. Khaksar, *Synthesis* **2011**, 490-496.

¹⁸⁹ A. F. Abdel-Magid, K. G. Carson, B. D. Harris, C. A. Maryanoff, R. D. Shah, *J. Org. Chem.* **1996**, *61*, 3849-3862.

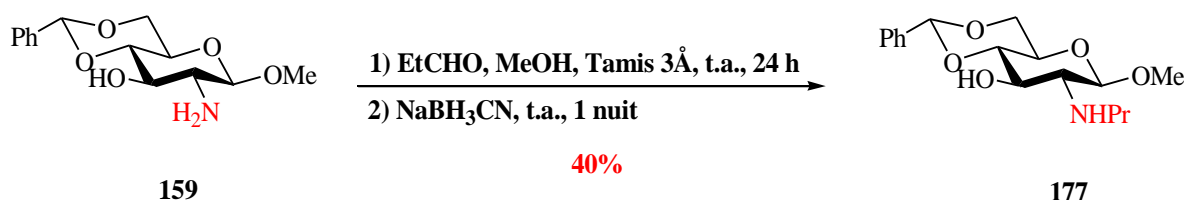


Schéma 110

Finalement, le dernier organocatalyseur possédant une amine secondaire est obtenu par réduction de la fonction acétamide par LiAlH_4 ¹⁹⁰ du produit perbenzylé **178**, résultant d'une réaction de benzylation en présence d'hydroxyde de barium¹⁹¹ afin d'éviter la réaction de benzylation de la fonction acétamide (Schéma 111).

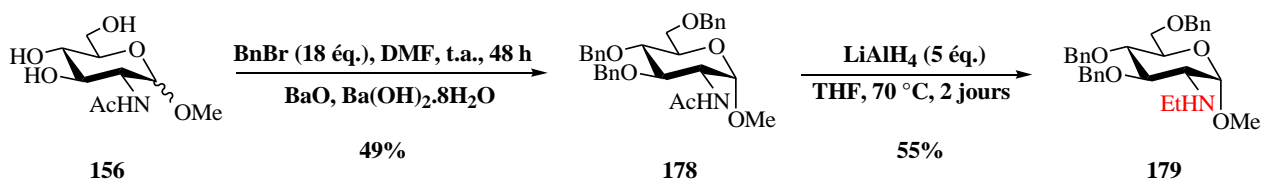


Schéma 111

II.B.2. Organocatalyse

II.B.2.a. Réaction d'aldolisation

Les catalyseurs synthétisés ci-dessus ont été premièrement évalués pour la catalyse des réactions d'aldolisation. Nous récapitulons, ici, les structures des organocatalyseurs utilisés pour la réaction d'aldolisation entre le 3-nitrobenzaldéhyde et la cyclohexanone.

¹⁹⁰ Y. Kajihara, H. Kodama, T. Endo, H. Hashimoto, *Carbohydr. Res.* **1998**, 306, 361-378.

¹⁹¹ J.-C. Jacquinet, P. Sinaÿ, *Carbohydr. Res.* **1974**, 32, 101-114.

Catalyse énantioselective par les oligomères de chitosane

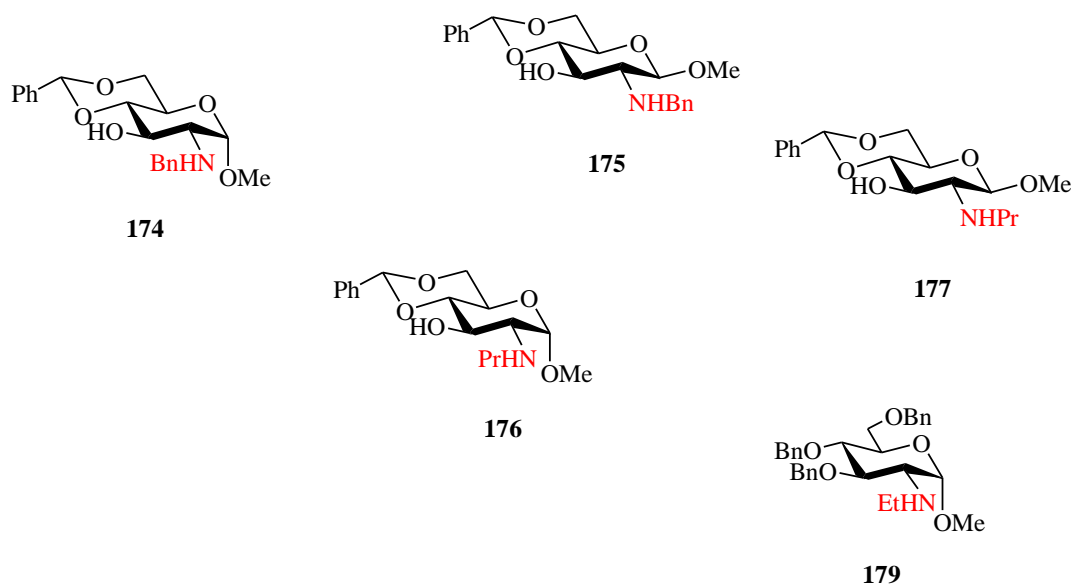
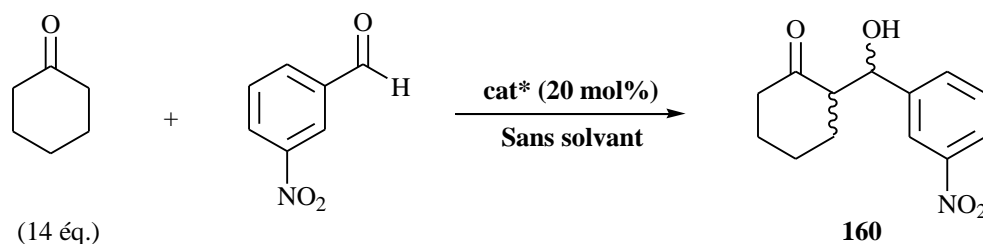


Schéma 112

Les résultats sont présentés dans le tableau 26.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane



entrée	t (h)	T °C	catalyseur	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	8	-40	174	-	-	-
2	24	0 → t.a.	174	-	-	-
3	24	-40 → t.a.	175	-	-	-
4	24	-40 → t.a.	176	-	-	-
5 ^d	24	t.a.	176	-	-	-
6 ^e	24	t.a.	176	-	-	-
7	24	t.a.	177	-	-	-
8	24	t.a.	179	-	-	-
9 ^f	16	t.a.	179	1.4/1	1/3	39
10 ^f	48	t.a.	179	1.4/1	0/5	37
11 ^d	48	t.a.	179	-	-	-
12 ^g	48	t.a.	179	3.2/1	2/1	14

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts des produits purs isolés

^d Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

^e Réaction réalisée avec 20 mol% de triéthylamine

^f Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide *para*-toluènesulfonique monohydraté

^g Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide trifluoroacétique

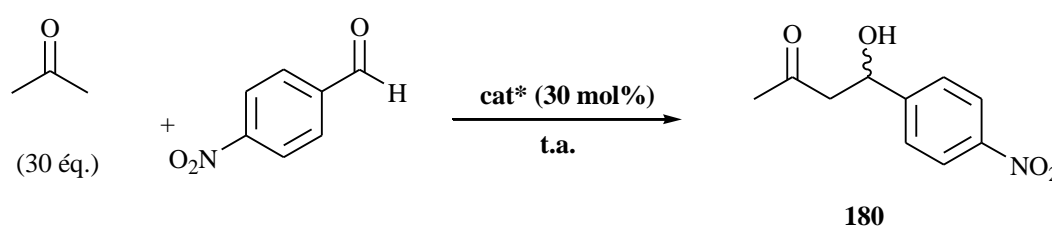
Tableau 26

Tous les organocatalyseurs se sont révélés inactifs pour la catalyse des réactions d'aldolisation en présence ou non de co-catalyseur (entrées 1-8, Tableau 26). L'utilisation de l'acide *para*-toluènesulfonique monohydraté (APTS.H₂O), à la place de l'acide benzoïque, permet d'augmenter le rendement. Dans ces conditions, les produits d'aldolisation sont isolés avec un

rendement de 39% (entrée 9, Tableau 26). L'acide trifluoroacétique s'est révélé moins performant (entrée 12, Tableau 26) et l'augmentation du temps de réaction n'a pas permis d'améliorer le rendement.

Il est important de noter que, dans les cas où il y a réaction, les produits sont obtenus sous forme racémique.

L'acétone a été également utilisée comme électrophile en présence du 4-nitrobenzaldéhyde (Tableau 27). Les conditions opératoires ont légèrement évoluées car, dans un souci de comparaison, nous avons repris les conditions des réactions d'aldolisation catalysées par la (*S*)-proline décrites par List.¹



entrée	t (h)	solvant	catalyseur	% ee ^a	Rdt (%) ^b
1	4	DMSO	(<i>S</i>)-proline	71	42
2	24	DMSO	174	-	13
3	24	DMSO	176	-	19
4	24	sans solvant	176	-	-
5 ^c	24	sans solvant	176	-	22
6 ^c	24	sans solvant	179	ndt	10

^a Déterminé par analyse HPLC chirale, ^b Rdts des produits purs isolés

^c Réaction réalisée avec 20 mol% d'acide benzoïque

Tableau 27

Les conditions décrites utilisaient 30 mol% de catalyseur dans le DMSO comme solvant (entrée 1, Tableau 27). Les réactions réalisées dans le DMSO comme solvant, aboutissent à de faibles rendements respectifs de 13 et 19% pour les catalyseurs **174** et **176**. Le catalyseur **176** est totalement inactif lorsque l'acétone est utilisée comme solvant. Cependant, en présence d'acide benzoïque, les produits d'aldolisation sont isolés avec de faibles rendements (entrées 5 et 6). Dans tous les cas, les organocatalyseurs sont totalement inefficaces pour l'induction asymétrique des réactions d'aldolisation ce qui se traduit par des excès énantiomériques nuls.

II.B.2.b. Réaction de Michael

Les catalyseurs synthétisés ci-dessus ont été deuxièmement évalués pour la catalyse des réactions de Michael (Schéma 113).

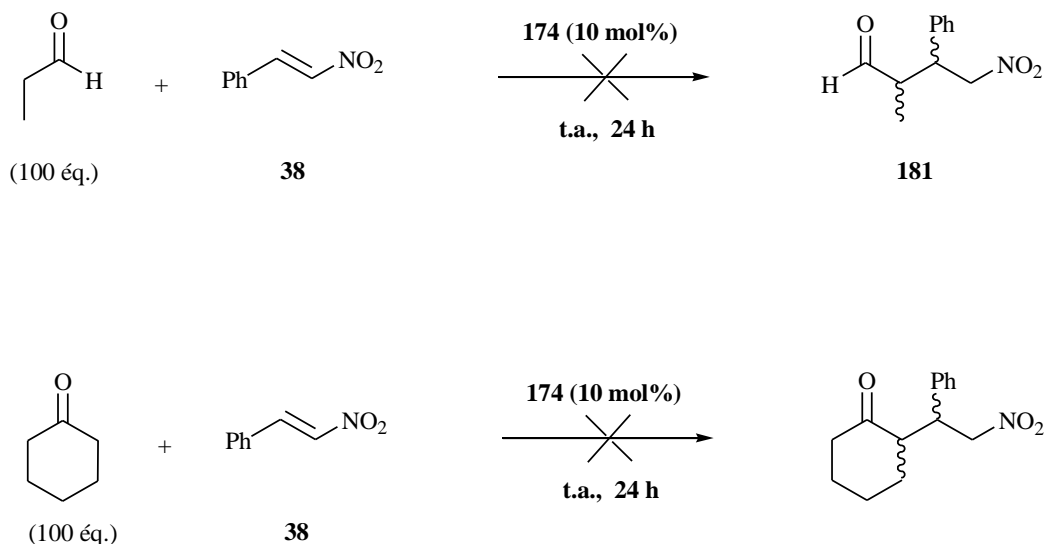


Schéma 113

Encore une fois, les réactions se sont révélées infructueuses en présence du catalyseur **174** quelques soient les conditions utilisées. Le catalyseur **176** a conduit aux produits d'addition avec un rendement de 15%, rendement estimé par RMN ^1H du brut. De nombreux produits secondaires non identifiés et très difficilement solubles dans les solvants ont été observés (Schéma 114).

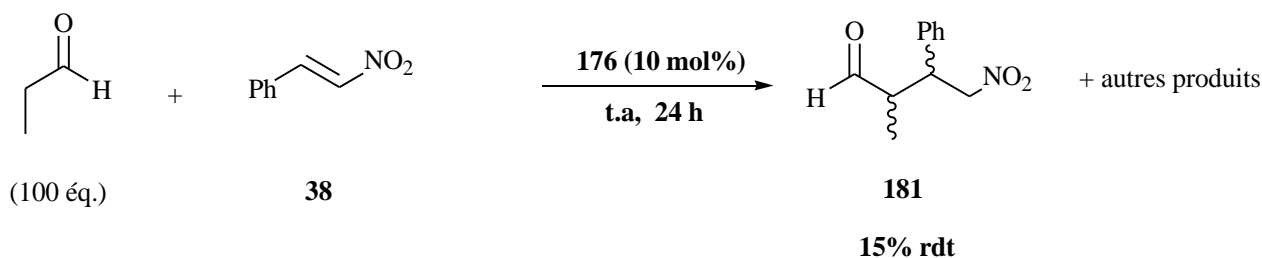


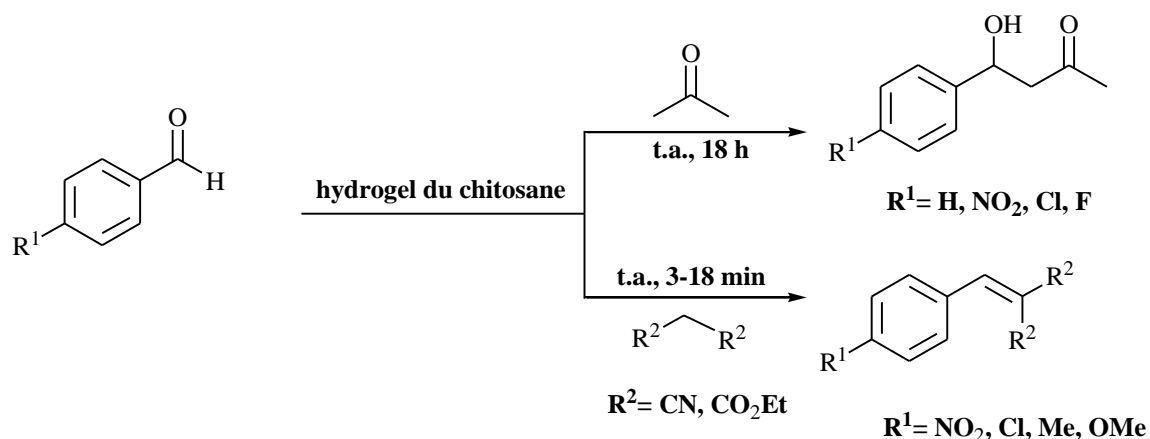
Schéma 114

Le fait d'introduire une substitution sur la fonction amine primaire n'a pas eu l'effet souhaité d'améliorer la réactivité des organocatalyseurs. Au contraire, dans tous les cas, cette modification a pour conséquence de diminuer fortement les rendements. L'explication, la plus plausible, serait que la substitution engendrerait une gêne stérique empêchant l'approche des réactifs (i.e. cyclohexanone) du site catalytique, étape clé pour la formation de l'intermédiaire énamine. Ces résultats montrent que nos études doivent se concentrer sur des dérivés d'amine primaire de la glucosamine et plus particulièrement sur des dérivés du chitosane, ce qui fera l'objet du paragraphe ci-dessous.

III. L'organocatalyse par des dérivés du chitosane

III.A. Travaux antérieurs

A notre connaissance, deux grandes études d'utilisation de biopolymère de chitosane ont été reportées. Reddy et *al.*¹⁹² ont préparé un hydrogel de chitosane de faible poids moléculaire, qui a été utilisé comme organocatalyseur dans les réactions d'aldolisation et de Knoevenagel.



Le solvant de choix dans les deux réactions est le DMSO. Même si les conversions sont bonnes voire élevées (jusqu'à 100%), les auteurs ont toujours obtenu les produits sous forme racémique traduisant ainsi une induction asymétrique nulle. Il est toutefois remarquable de constater que le biopolymère de chitosane soit capable de catalyser la réaction de Knoevenagel, qui ne requiert que quelques minutes pour une conversion totale.

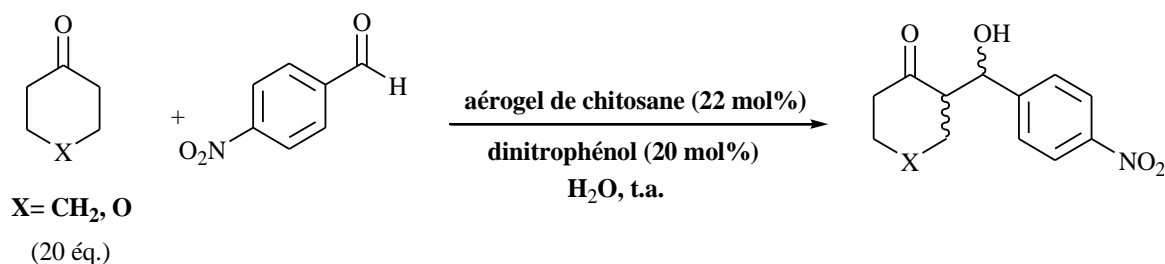
Une étude similaire réalisée par Ricci et *al.*¹⁹³ utilise cette fois le chitosane sous forme d'aérogel. Les formulations d'aérogel de chitosane sont caractérisées par une grande surface spécifique (jusqu'à 350 m² g⁻¹) et une grande accessibilité des sites fonctionnels (jusqu'à 5.2 mmol g⁻¹ NH₂)¹⁹⁴. L'activité de cet organocatalyseur a été évaluée dans la réaction d'aldolisation en présence d'eau comme milieu de réaction. Des rendements élevés et de bons excès énantiomériques ont été obtenus (Tableau 28).

¹⁹² K. R. Reddy, K. Rajgopal, C. U. Maheswari, M. Lakshmi Kantam, *New J. Chem.* **2006**, *30*, 1549-1552.

¹⁹³ A. Ricci, L. Bernardi, C. Gioia, S. Vierucci, M. Robitzer, F. Quignard, *Chem. Commun.* **2010**, *46*, 6288-6290.

¹⁹⁴ F. Quignard, R. Valentin, F. Di Renzo, *New J. Chem.* **2008**, *32*, 1300-1310.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane



entrée	t (h)	X	syn/anti	% ee (syn/anti)	Rdt (%)
1	24	O	30/70	24/72	78
2	24	CH ₂	24/76	92/75	85

Tableau 28

Bien que la réaction d'aldolisation soit possible sans la présence d'un co-catalyseur acide, des temps de réaction de 48 h sont nécessaires pour conduire à des rendements et des stéréosélectivités comparables à ceux présentés dans le tableau 28.

Les exemples d'aérogel et d'hydrogel de chitosane cités ci-dessus présentent un exemple de catalyse hétérogène où le catalyseur peut être recyclé et utilisé de nouveau, ce qui est considéré comme un avantage pour ces organocatalyseurs. Cependant, la structure et le nombre de site catalytique (NH_2) n'est pas bien défini et par conséquent l'impact de ces facteurs sur la réactivité et la stéréosélectivité dans les réactions reste toujours flou.

III.B. Synthèses

Comme mentionné dans le chapitre 2, la réaction d'acétylolyse de la chitine permet l'accès au chitobiose (DP2) et chitotriose (DP3) isolés dans des quantités de l'ordre du gramme en une seule étape à partir de la chitine. Ces oligomères de petites tailles représentent des précurseurs avancés d'organocatalyseurs issus de la biomasse.

Pour cette étude, nous avons envisagé l'accès à des structures solubles dans l'eau ou dans les solvants organiques et de comparer leur activité à leurs analogues monomériques. Les synthèses de ces catalyseurs sont résumées ci-dessous.

III.B.1. Synthèses d'organocatalyseurs solubles dans l'eau

Un organocatalyseur doit être doté d'une bonne réactivité et d'un grand pouvoir d'induction asymétrique mais, en même temps, doit être facilement synthétisé. L'obtention de catalyseurs à partir d'oligomères de chitine de taille définie doit donc faire intervenir des voies synthétiques simples et rapides.

III.B.1.a. Synthèses de dérivés β -thioglycosides

Les synthèses des différentes molécules commencent par l'introduction d'un groupement stable en position anomérique des différents oligomères peracétylés (**78** et **79**). Nous avons mentionné que l'action du triméthyl(phénylthio)silane, en présence du diiodure de zinc, conduit exclusivement au β -thioglycoside. Nous avons réitéré cette expérience sur le chitobiose peracétylé **78** (Schéma 116).

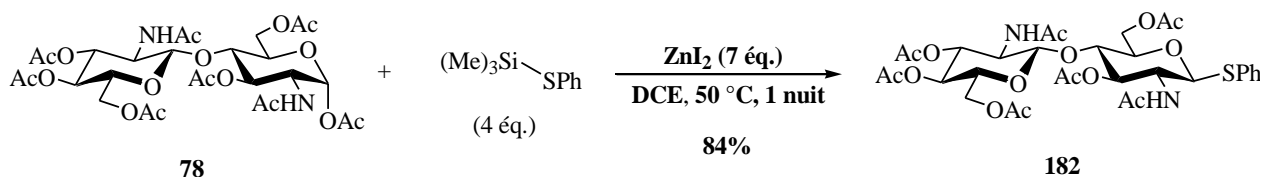


Schéma 116

Le rendement en produit **182** varie souvent en fonction du lot de réactif. Bien que le produit de départ **78** soit soluble dans les solvants classiques (i.e. CHCl_3), le dérivé thioglycosylé **182** est très peu soluble, rendant la purification par colonne chromatographique sur gel de silice compliquée. Une méthode simple pour isoler ce produit consiste à le faire précipiter par addition de méthanol au mélange brut, obtenu après évaporation du dichloroéthane.

A ce stade, le thioglycoside **182** peut directement être converti en un organocatalyseur par une réaction de déprotection simultanée des fonctions alcools et amine. L'utilisation d'un large excès d'hydrate d'hydrazine ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) permet d'obtenir le produit déprotégé quantitativement mais 6 jours de réaction sont nécessaires (Schéma 117).

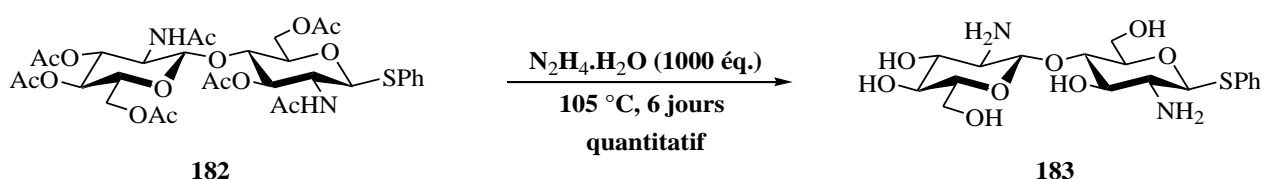


Schéma 117

La RMN du produit révèle cependant la présence de l'hydrazine monoacétylée comme sous-produit, que nous n'avons pas pu séparer ni par colonne chromatographique ni par recristallisation.

Pour palier au problème, l'hydrazine hydrate a été remplacée par l'hydroxyde de barium ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) qui présente l'avantage d'être faiblement toxique comparé aux dérivés d'hydrazine.

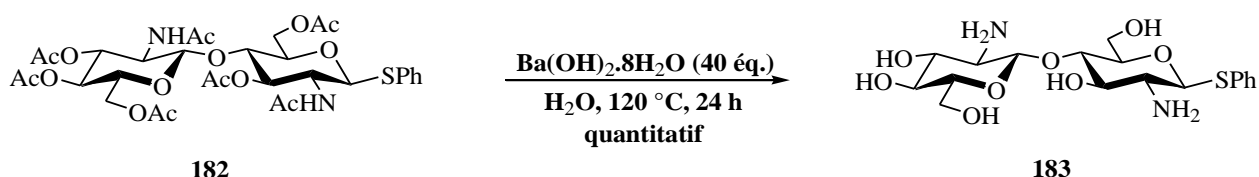


Schéma 118

Comme précédemment, la conversion est totale après seulement 24 h mais il nous a été impossible de séparer les sels de barium du produit déprotégé **183**. Cette difficulté de purification de **183** nous a forcé à choisir une autre voie de synthèse reposant sur l'utilisation de composés *N*-trifluoroacétylés. Récemment, Rota et *al.*¹⁹⁵ ont montré la possibilité de réaliser une réaction de *N*-transacylation d'amides secondaires par des anhydrides perfluorés pour obtenir l'amide correspondant. Ces amides trifluorés sont plus réactifs que leurs analogues hydrogénés et peuvent donc être facilement désacétylés dans des conditions douces, comme l'utilisation de LiOH dissous dans un mélange eau-méthanol à température ambiante.¹⁹⁶

Une modification des conditions opératoires de la réaction de transacylation nous a permis d'isoler le produit désiré quantitativement en seulement 20 minutes (Schéma 119).

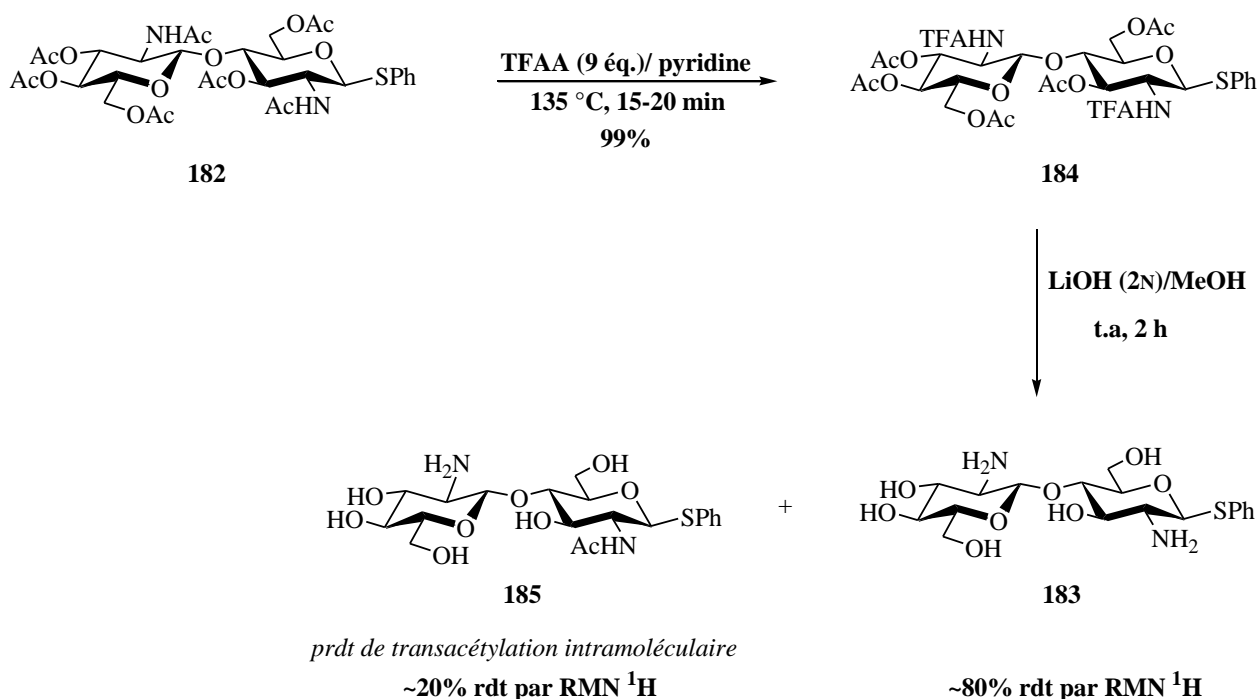


Schéma 119

¹⁹⁵ P. Rota, P. Allevi, R. Colombo, M. L. Costa, M. Anastasia, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 1850-1853.

¹⁹⁶ A. G. Pearson, M. J. Kiefel, V. Ferro, M. von Itzstein, *Org. Biomol. Chem.* **2011**, *9*, 4614-4625.

Dans ces conditions, la pyridine est utilisée comme solvant à la place de l'acétonitrile. Les dérivés fluorés (NHTFA) sont plus solubles dans les solvants organiques et donc plus faciles à manipuler que leur analogues non fluorés (NHAc). Le traitement de **184** avec une solution de LiOH (C = 2N, 25 éq.) dans le méthanol conduit au produit déprotégé **183**. Une analyse spectroscopique par RMN du proton révèle que le produit désiré est contaminé par le composé mono-*N*-acétylé **185**. Par intégration des aires correspondantes aux protons H-1 des deux produits, un rapport de 8/2 a été déterminé en faveur de produit **183**. Afin d'identifier l'unité de glucosamine acétylée, des analyses de RMN (TOCSY) ont été réalisées. Cette méthode repose sur le transfert d'énergie d'un proton excité aux protons qui lui sont liés par un couplage scalaire. Cependant, l'extrême proximité des deux protons H-1 ne nous a pas permis de conclure sur la position exacte du groupement acétyle. Nous pouvons toutefois supposer que la molécule **185** représente la structure la plus probable (voir ci-dessous).

Ce produit secondaire est toujours présent même si le nombre d'équivalents de LiOH ou le temps de réaction sont augmentés. De plus, le traitement du brut réactionnel avec l'hydrazine hydratée conduit exclusivement au produit **183** avec une pureté supérieure à 95% confirmant ainsi que le sous-produit était bien un produit acétylé. La formation de ce dernier résulterait d'une réaction de transacétylation intramoléculaire dont le mécanisme est proposé dans le schéma 120.

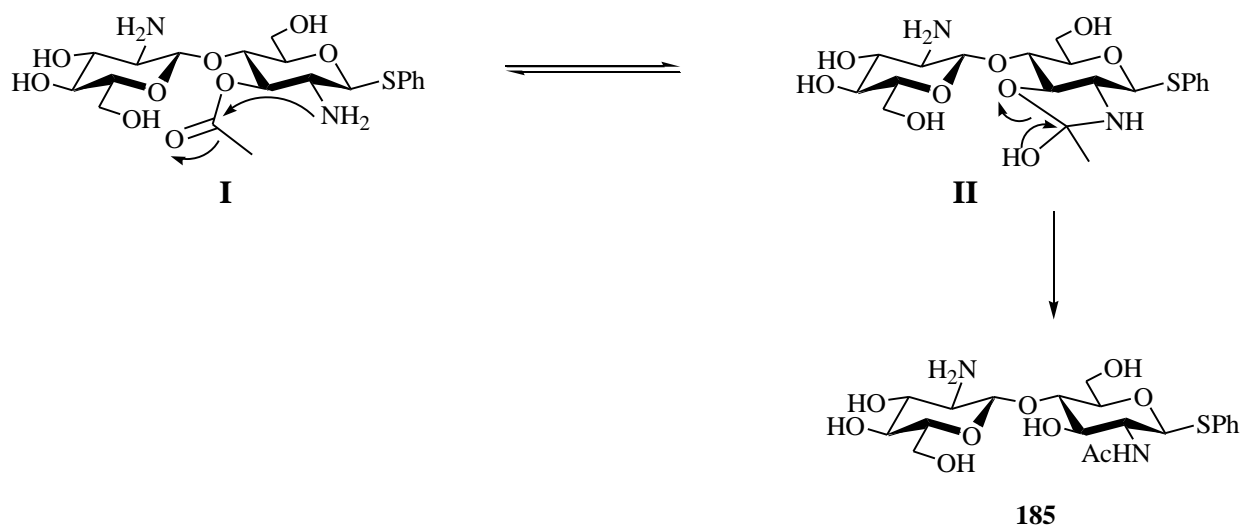


Schéma 120

En effet, la réaction de déprotection de la fonction amine transite par une réaction de transestérification de l'alcoolate en position C-3 sur le groupement acétyle porté par l'amine conduisant à un intermédiaire réactionnel 3-*O*-acétylé. Or, l'accessibilité de la position 3 du sucre réducteur est réduite compte-tenu de l'encombrement généré par la deuxième unité glucosamine. Nous pouvons donc supposer que la molécule **I** est l'un des derniers intermédiaires réactionnels formés. C'est à partir de ce produit qu'une réaction de transacylation intramoléculaire peut donc avoir lieu pour conduire au produit mono-*N*-acétylé **185**.

La solution logique pour résoudre ce problème est de réaliser la séquence en deux étapes : une étape de *O*-désacétylation suivie de la déprotection des fonctions amine (Schéma 121).

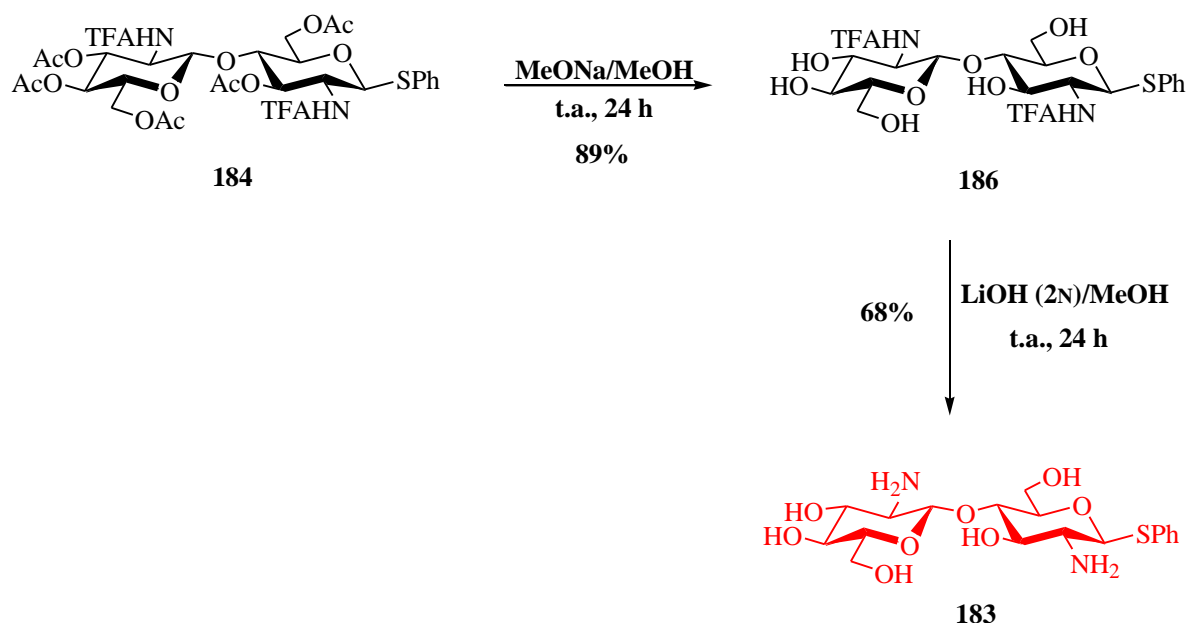


Schéma 121

Ainsi, une désacétylation dans les conditions de Zemplén¹⁹⁷ (méthylate de sodium catalytique dans du méthanol) permet d'obtenir le polyol **186** avec un rendement de 89%. Un traitement au LiOH dans le méthanol conduit au composé **183**, obtenu avec 68% de rendement et une pureté supérieure à 95%. Ce catalyseur est particulièrement adapté pour initier des réactions d'organocatalyse dans l'eau. Il faut noter, que **186** et **183** sont obtenus sans purification sur gel de silice. Seuls des traitements sur résine ont permis de neutraliser les excès de réactifs. Ainsi, le méthylate de sodium, le LiOH et le trifluoroacétate de sodium (CF₃COONa) formé lors de la dernière étape sont neutralisés par une résine acide (Dowex® ou Amberlite®). Dans ces conditions de purification, les dérivés des réactifs sont élués alors que le produit **183** est quant-à-lui retenu sur la résine sous la forme de sels d'ammonium. Une fois toutes les impuretés éliminées, une solution d'ammoniaque concentrée (C = 7M) permet d'éluer le composé **183**.

Cette séquence réactionnelle, comportant l'introduction de l'aglycone thiophényle, la réaction de *N*-trifluoroacétylation, la désacétylation de Zemplén et le traitement au LiOH, est appliquée à la synthèse du trimère, obtenu en 4 étapes à partir du chitotriose peracétylé **79** avec un rendement global de 24% (Schéma 122).

¹⁹⁷ a) G. Zemplén, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1927**, 60, 1555-1564; b) K. Ágoston, A. Dobó, J. Rákó, J. Kerékgyártó, Z. Szurmai, *Carbohydr. Res.* **2001**, 330, 183-190.

Catalyse énantioselective par les oligomères de chitosane

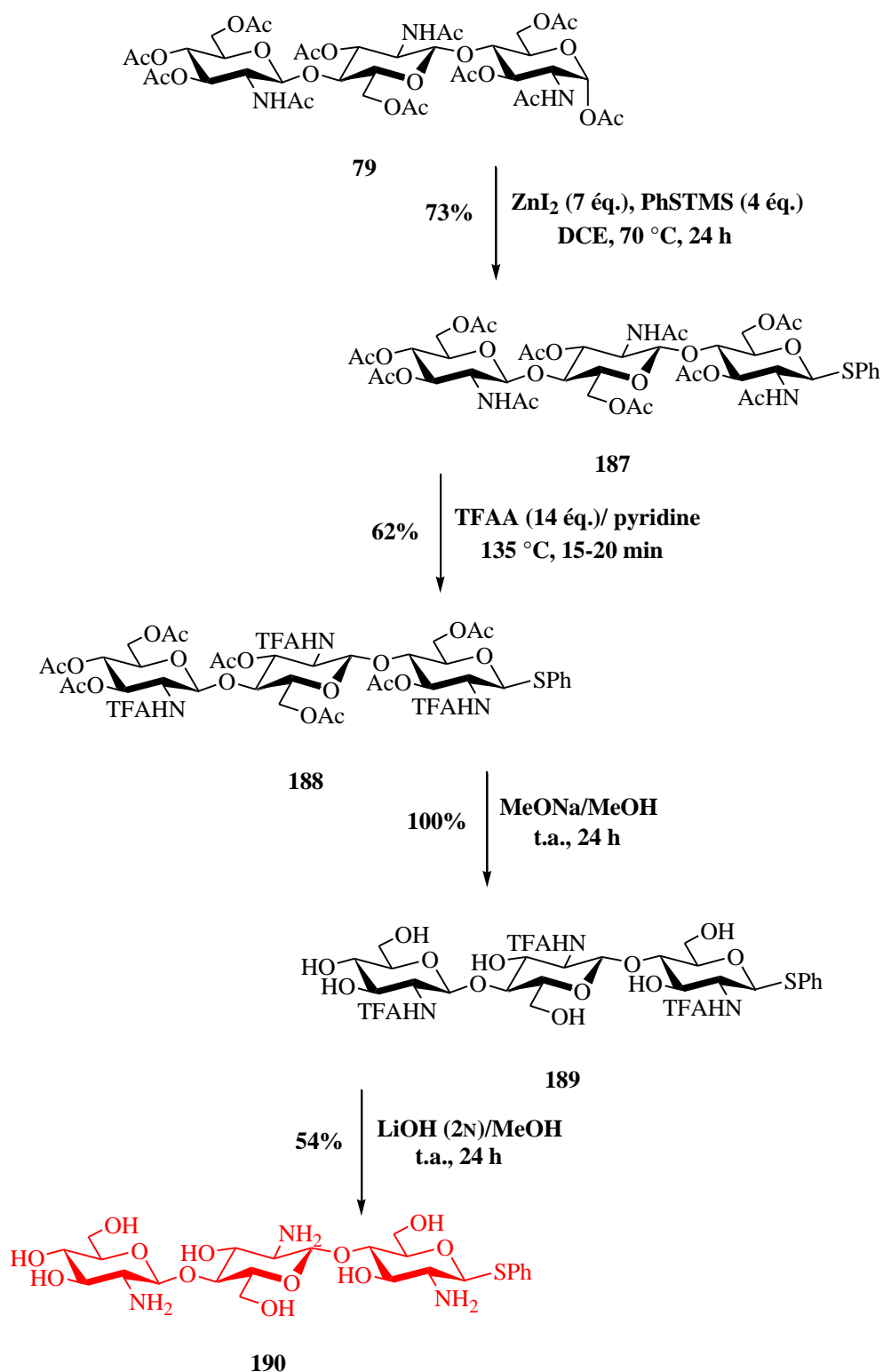


Schéma 122

L'étape délicate de cette synthèse réside dans l'introduction du groupement thiophényle qui nécessite un contrôle strict de la température. Une température de 50 °C ne permet pas d'obtenir une conversion satisfaisante. Par contre, si la température est trop élevée (100 °C), seuls des

produits de dégradation sont observés. Nous avons donc optimisé les conditions réactionnelles : une température de 70 °C et 24 h de réaction fournit le produit **187** avec un rendement de 73%.

Afin de pouvoir étudier l'influence du degré de polymérisation, le monomère thioglycosylé **194** est également synthétisé (Schéma 123).

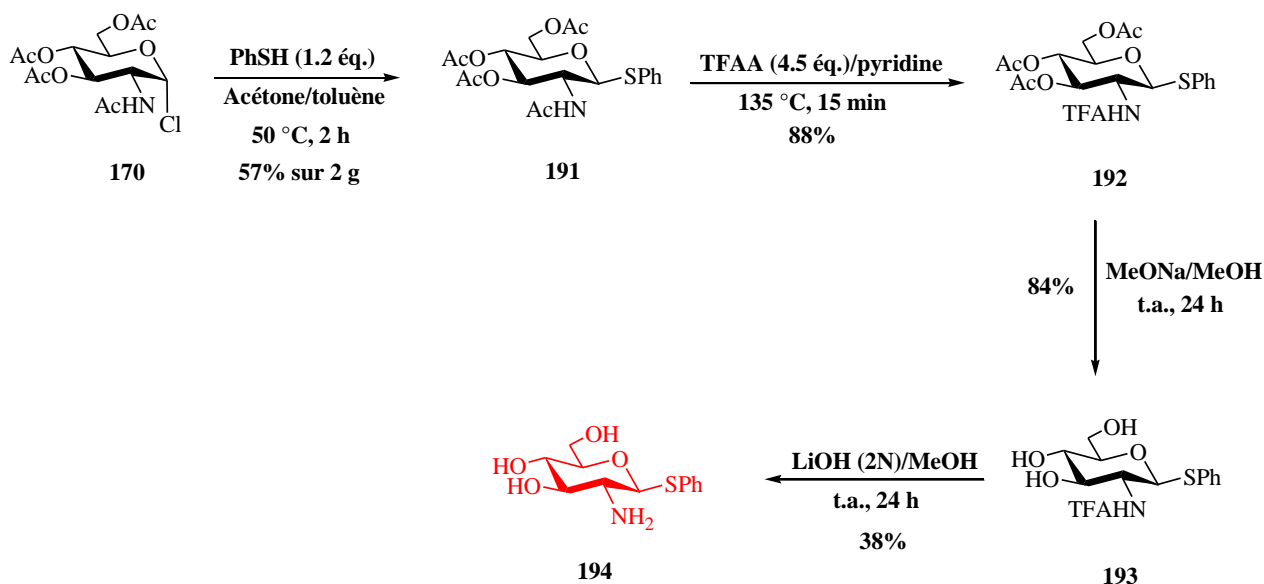


Schéma 123

Bien que le composé **191** peut résulter de la réaction de glycosylation entre *N*-acétylglucosamine peracétylée **82** et le triméthyl(phénylthio)silane, nous avons choisi d'utiliser le thiophénol comme entité nucléophile, dont le prix est plus abordable que son analogue silylé, et le chlorure d'Horton **170** comme produit de départ en raison du stock important présent au laboratoire. L'association de ces deux produits conduit au thioglycoside de configuration β avec un rendement de 57% à l'échelle du gramme. La séquence réactionnelle mise au point précédemment permet d'obtenir le monomère **194**. Le rendement de la dernière étape de la séquence réactionnelle est très modeste et vient du fait qu'une certaine partie du produit est retenue sur la résine acide utilisée lors de la purification.

III.B.1.b. Synthèses de dérivés β-méthylglycosides

Nous avons également synthétisé une famille d'organocatalyseurs, qui diffère des structures précédentes par leur partie aglycone en position anomérique. Le méthanol est sans aucun doute le nucléophile organique le plus simple à introduire sur la position anomérique d'un sucre. La voie de synthèse que nous avons choisie consiste en l'ouverture de l'oxazoline **195**, générée par traitement acide au triflate de triméthylsilyle du *N,N*-diacétylchitobiose peracétylé **78** (Schéma 124).¹³⁴

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

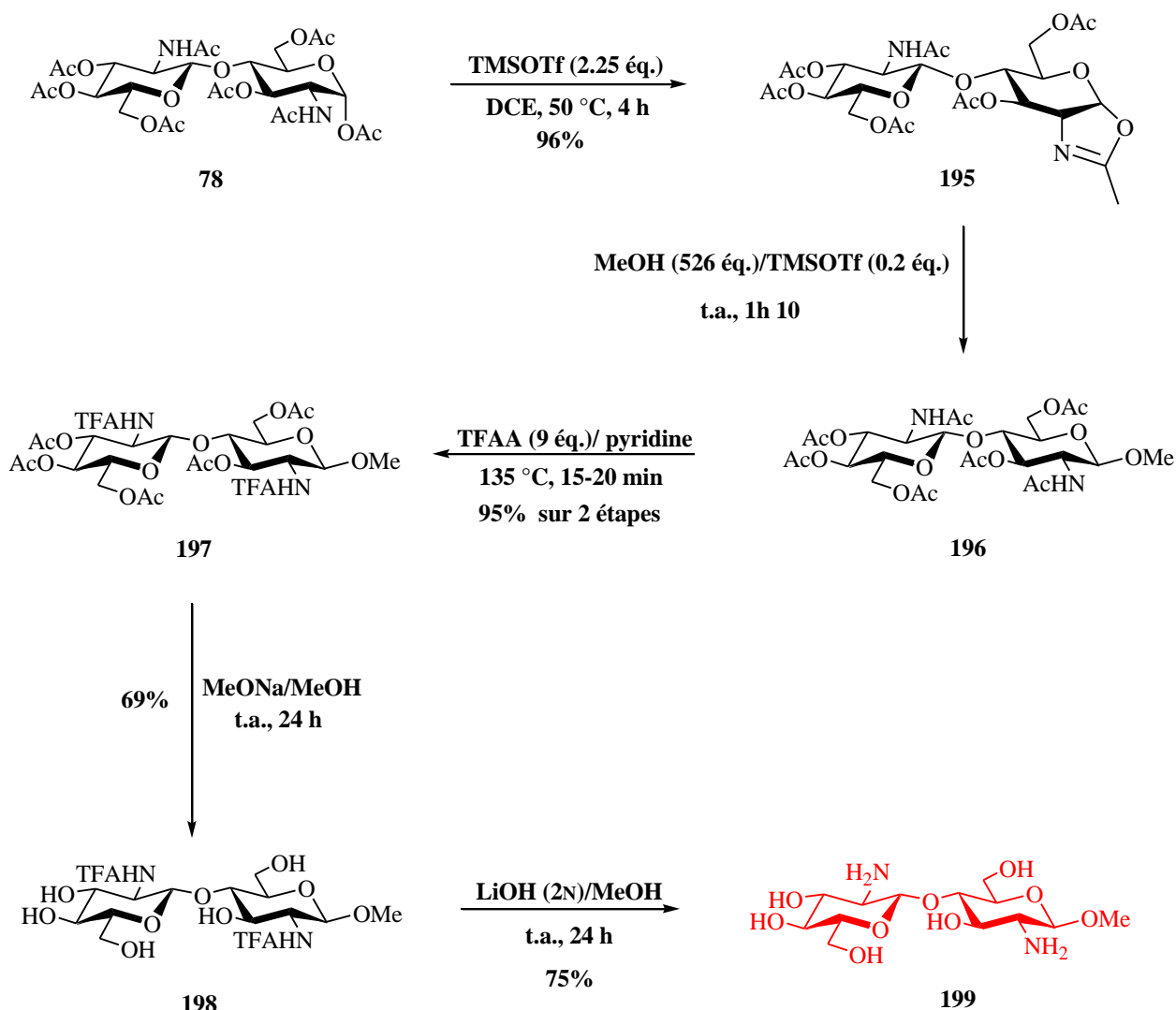


Schéma 124

Les conditions d'ouverture de l'oxazoline décrites par Kuzuhara, à savoir 10 mol% de TMSOTf à 50 °C pendant 15 minutes, ne nous ont pas permis d'obtenir le β-méthylglycoside avec un rendement satisfaisant. Une optimisation de la réaction a donc été réalisée. Nous avons trouvé que la réaction, agitée à température ambiante et en présence de 20 mol% de catalyseur acide, permettait d'obtenir le produit désiré avec une conversion totale en chromatographie sur couche mince. La faible solubilité de ce produit nous a conduit à réaliser une réaction de *N*-trifluoroacétylation par action de l'anhydride trifluoroacétique dans la pyridine. Le composé **197** est isolé avec un rendement de 95% sur les deux étapes. Les caractérisations spectroscopiques du composé **196** ont tout de même été réalisées sur une fraction purifiée par colonne chromatographique sur gel de silice. Les deux dernières étapes suivent la séquence que nous avons mise au point (désacétylation de Zemplén suivi du traitement au LiOH) pour conduire à l'organocatalyseur **199** avec un rendement global de 47% pour 5 étapes.

Comme dans le cas précédent, le monomère correspondant est synthétisé selon la même stratégie (Schéma 125).

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

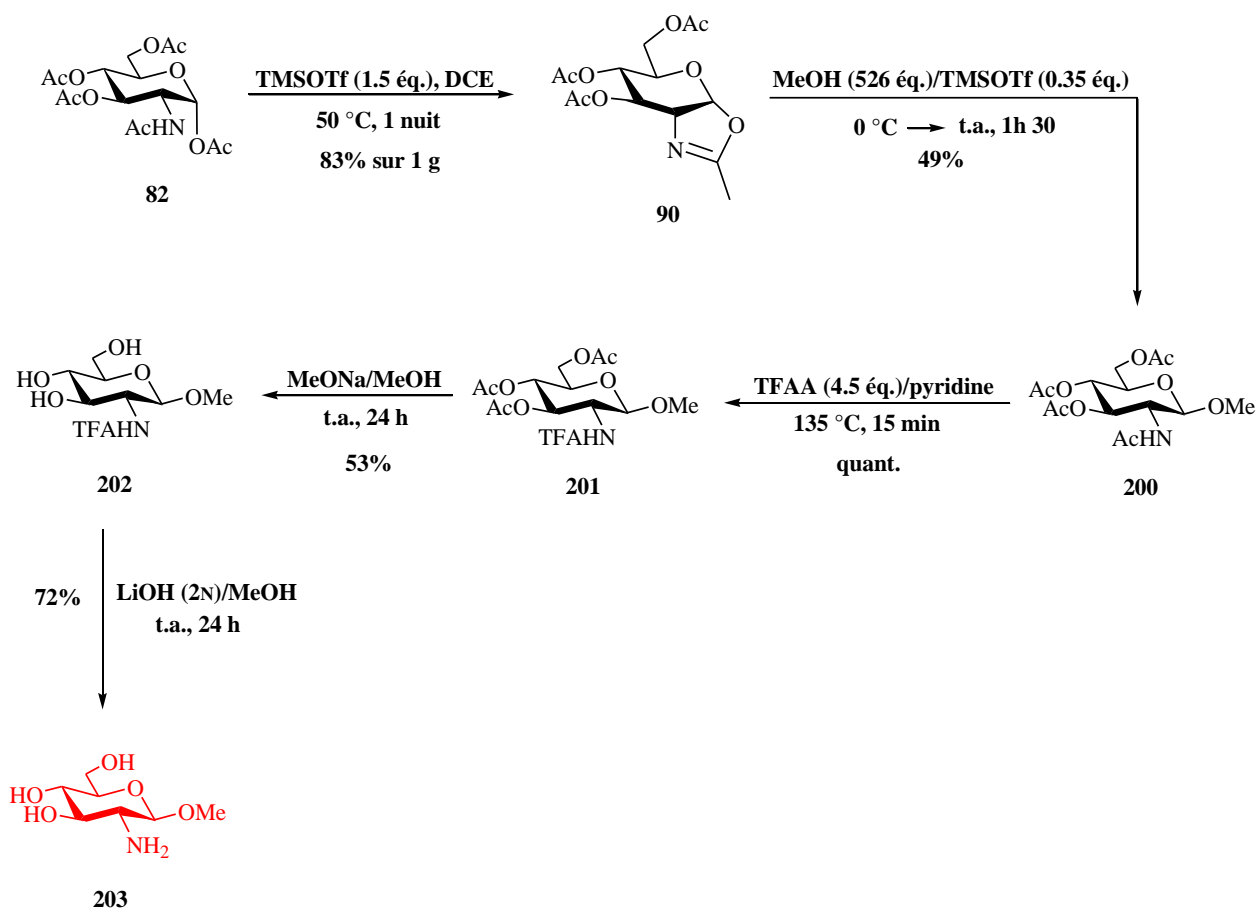


Schéma 125

Les réactions impliquant le monomère étant plus rapides, l'addition de triflate de triméthylsilyle à une solution d'oxazoline **90** dans le méthanol est effectuée à 0 °C avant de laisser remonter la réaction à température ambiante. Ces conditions limitent la formation de produits secondaires, produits désacétylés résultant de la réaction de transestérification avec le méthanol. Le composé **203** a été isolé avec un rendement global de 16%.

III.B.2. Synthèses d'organocatalyseurs solubles dans les solvants organiques

Dans le but d'explorer tous les potentiels des oligomères issus de la biomasse comme organocatalyseurs, il était nécessaire de produire des structures complètement protégées afin de pouvoir effectuer les réactions énantiosélectives dans les solvants organiques.

III.B.2.a. Synthèses de dérivés β -thioglycosides

Ces composés protégés sont facilement obtenus à partir de précurseurs déjà synthétisés dans la partie précédente. Ainsi le dérivé **182** du *N,N*-diacétylchitobiose peracétylé est un précurseur avancé du chitobiose **204** dont les fonctions alcools sont protégées sous forme d'acétates.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

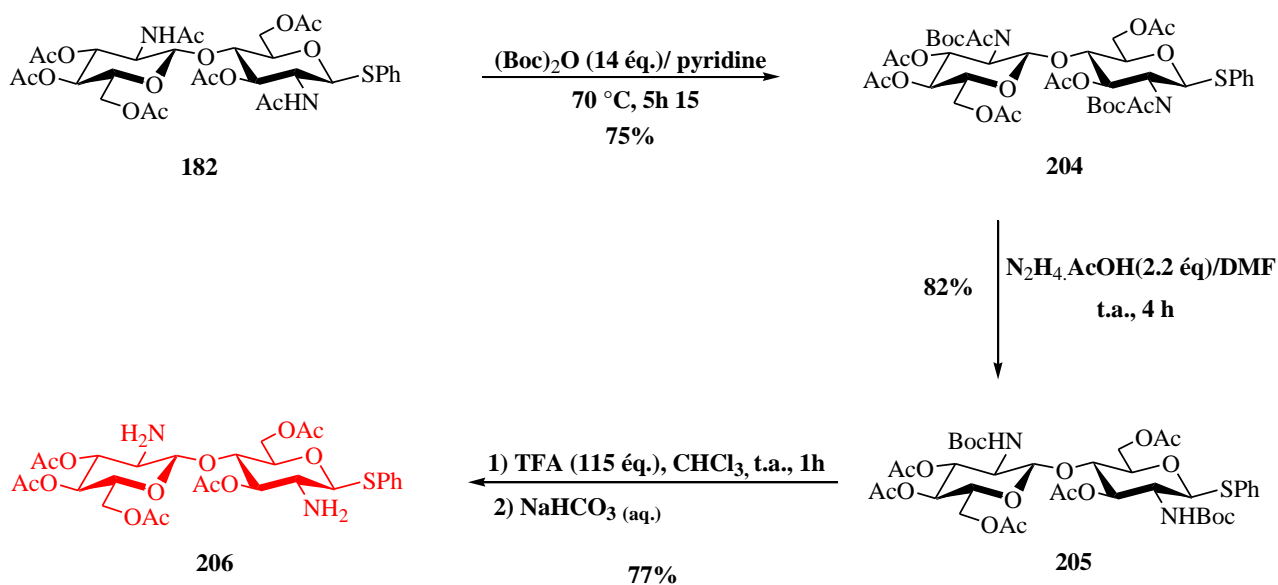


Schéma 126

La déprotection sélective des fonctions amine est réalisée en deux étapes. Les fonctions amides sont premièrement transformées en carbamates par action du dicarbonate de di-*tert*-butyle dans la pyridine suivi d'un traitement à l'acétate d'hydrazine qui permet de réaliser la désacétylation sélective des imides. Le composé **205** est isolé avec un rendement global de 62%. Ce composé, bien que totalement protégé, présente une solubilité assez limitée dans les solvants organiques. C'est pourquoi la dernière étape d'hydrolyse acide des carbamates par l'acide trifluoroacétique (TFA) dans le $CHCl_3$ requiert un contrôle de la concentration. La concentration que nous avons utilisée est de 0.06 M. Une concentration plus élevée fait précipiter le composé de départ **205**. Le catalyseur **206**, obtenu après neutralisation des sels d'ammonium, est un solide blanc, stable, et soluble dans la majorité des solvants organiques.

Le catalyseur obtenu précédemment possède des groupements électroattracteurs ce qui peut diminuer la réactivité des fonctions amine. Nous avons donc voulu synthétiser un composé dont les groupements acétyles ont été remplacés par des groupements benzyles. L'approche rétrosynthétique, représentée ci-dessous, fait intervenir le même composé de départ, le produit **182**.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

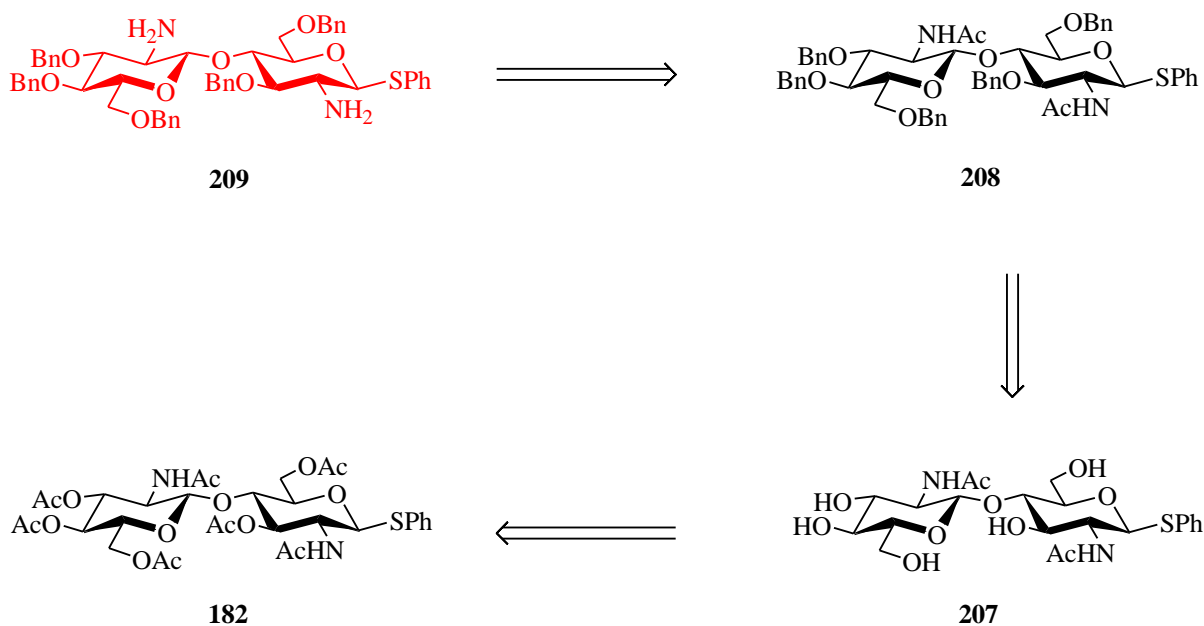


Schéma 127

Le thioglycoside **207** est obtenu quantitativement par une réaction de désacétylation dans les conditions de Zemplén. Malheureusement, la réaction de benzoylation sélective des alcools par le bromure de benzyle en présence de BaO/Ba(OH)₂.8H₂O conduit à un mélange complexe de produits. Nous avons donc abandonné cette synthèse.

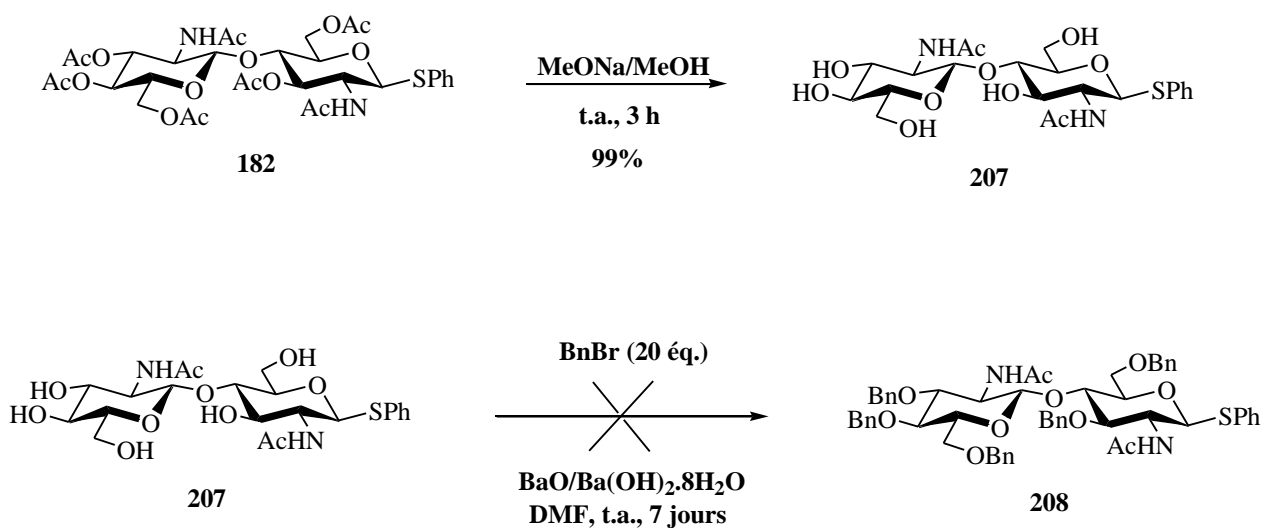


Schéma 128

III.B.2.b. Synthèses de dérivés β -méthylglycosides

Afin d'obtenir des catalyseurs ne possédant pas de groupements attracteurs, nous avons envisagé de protéger les fonctions alcool sous forme d'éther silylé. Le β -méthylchitobioside **199**

peut être synthétisé facilement. C'est la raison pour laquelle nous l'avons utilisé comme composé de départ (Schéma 129).

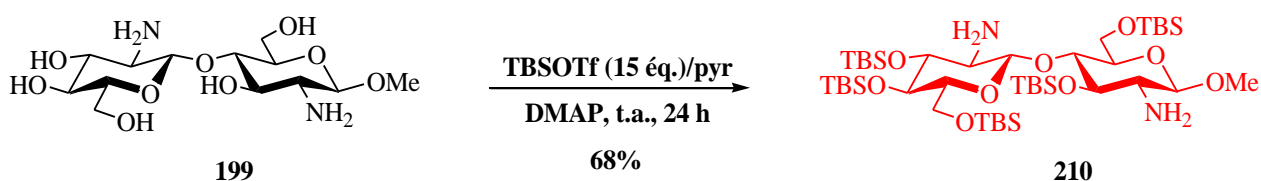


Schéma 129

Un traitement au triflate de *tert*-butyldiméthylsilyle dans la pyridine, en présence de DMAP, permet d'obtenir sélectivement les alcools protégés sous forme d'éthers silylés avec un rendement de 68%. Pour une raison inconnue, nous n'avons pas pu reproduire cette expérience sur une échelle plus importante ; des produits de silylation partielle persistent dans le milieu malgré un excès de réactif.

Nous avons pu synthétiser une série de catalyseurs dérivés de la chitine selon des procédures simples, courtes et efficaces. Ces oligomères se différencient par leur degré de polymérisation, leur taille et la nature de leur substituant. Avec ces produits en main, les réactions énantiosélectives les plus courantes ont été étudiées.

III.C. L'organocatalyse

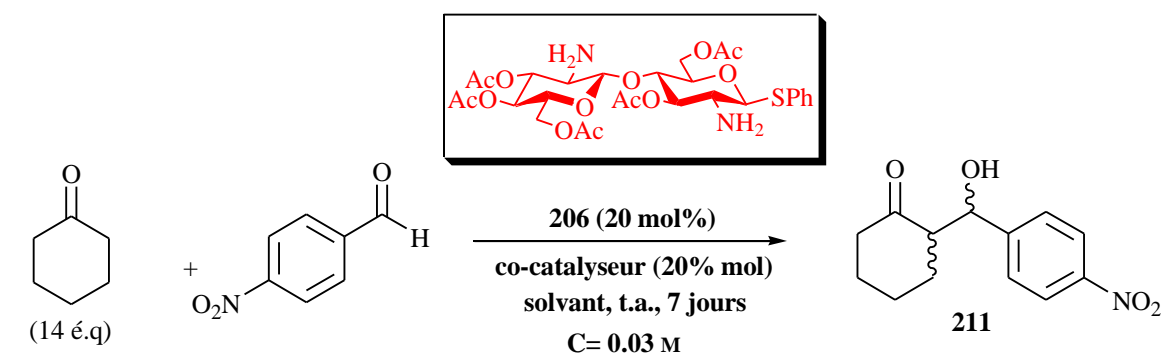
Cette partie se divisera en deux sous-parties à savoir l'organocatalyse dans les solvants organiques et celle réalisée en milieu aqueux. Pour toutes les réactions organocatalysées, les rendements et les rapports diastéréoisomériques ont été déterminés par analyse des spectres RMN ¹H du brut réactionnel en présence d'un étalon interne approprié. De même, le brut réactionnel dilué est directement soumis à une analyse HPLC utilisant une colonne chirale. La détermination de la configuration des adduits a été établie par comparaison avec les données de la littérature.

III.C.1. L'organocatalyse dans les solvants organiques

La réaction d'aldolisation énantiosélective impliquant la cyclohexanone et le 4-nitrobenzaldéhyde a été choisie comme réaction modèle. Nous présenterons ici les résultats de deux catalyseurs solubles en milieu organique.

L'effet du solvant a été étudié en présence du catalyseur **206**, le β-thiochitobioside peracétylé. Les résultats sont présentés dans le tableau 29.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane



entrée	solvant	co-catalyseur	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	DCM	-	-	-	-
2	DCM	ac.4-nitrobenzoïque	1/1.1	9/29	76
3	DCM	ac.stéarique	1/1.5	7/33	24
4	DCM	dinitrophénol	1/1	13/19	3
5	sans solvant	-	1/1.8	22/12	15
6	sans solvant	dinitrophénol	1/1.4	24/24	9
7	MeOH	-	1/1.3	17/14	41
8	MeOH	ac.4-nitrobenzoïque	-	-	-
9 ^d	THF	ac.benzoïque	-	-	-
10 ^e	THF	ac.4-nitrobenzoïque	-	-	-

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts déterminés par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde, ^d Temps de réaction est de 15 h

^e Réaction réalisée à -40 °C pendant 24 h

Tableau 29

Nous avons constaté que la réaction conduite dans le dichlorométhane ne permet pas, après 7 jours de réaction, d'isoler les produits d'aldolisation (entrée 1). L'utilisation d'un co-catalyseur acide est nécessaire pour observer une conversion (entrées 2-4). Parmi les trois acides testés, l'acide 4-nitrobenzoïque s'est révélé le plus efficace en terme de rendement. Dans ces conditions, les adduits sont isolés avec 76% de rendement.

Afin d'augmenter les rendements, la réaction est réalisée sans l'addition de solvant supplémentaire autre que la cyclohexanone, qui joue le double rôle de réactif et de solvant

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

(entrées 5-6). Mais ce protocole n'a pas permis d'améliorer les résultats puisque de faibles rendements sont obtenus. De manière surprenante, le méthanol s'est avéré être un solvant permettant d'isoler les produits désirés avec un rendement moyen de 41% mais qui est supérieur à ceux obtenus dans le dichlorométhane ou le tétrahydrofurane. Par contre, nous avons été surpris de constater que l'addition d'un co-catalyseur acide inhibe complètement la réaction (entrée 8). Ce résultat reste encore inexpliqué.

Toutefois, lorsque que nous avons observé une conversion notable, les excès énantiomériques restent faibles et n'excèdent pas les 33%.

Le manque de réactivité de ce catalyseur peut s'expliquer par la présence des groupements acétyles électroattracteurs qui diminuent la nucléophilie des fonctions amine, siège de la réaction. Nous avons donc utilisé le dérivé du chitobiose silylé **210**, considéré comme plus réactif (Schéma 130).

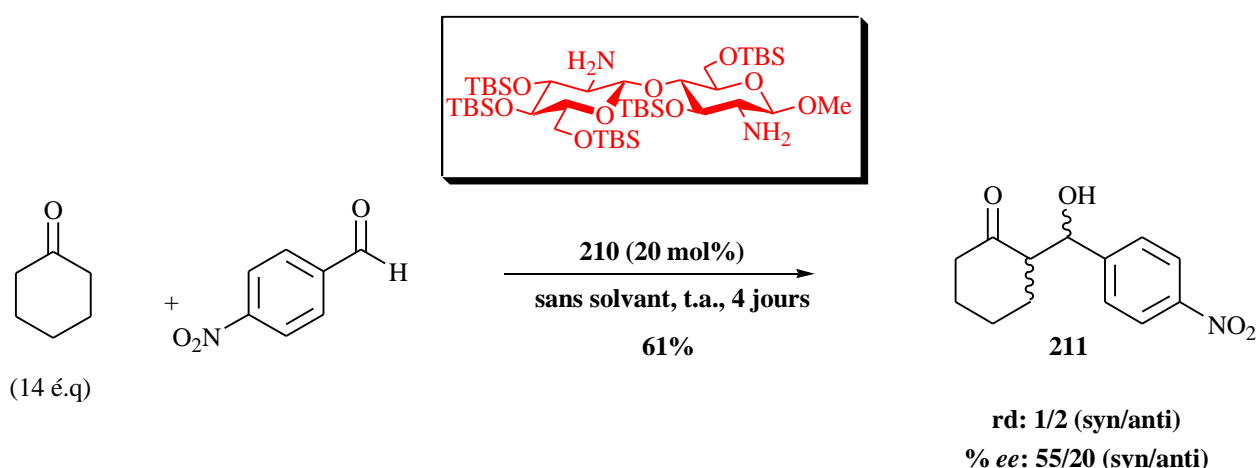


Schéma 130

Dans les conditions dites sans solvant, le rendement, après 4 jours, est de 61%. Ce résultat conforte donc notre hypothèse que l'utilisation de groupements protecteurs de fonctions alcool riches en électrons permet d'augmenter les rendements. Le rapport diastéréoisomérique, déterminé par analyse RMN du proton, est de 1/2 en faveur du diastéréoisomère *anti*. Une analyse par chromatographie liquide haute performance chirale permet de calculer les excès énantiomériques qui sont de 55% pour le diastéréoisomère *syn* et de 20% pour diastéréoisomère *anti*. Ces excès sont supérieurs à ceux obtenus en présence du catalyseur **206**.

Malheureusement, faute de produit, nous n'avons pas pu approfondir cette étude mais il serait intéressant de le faire compte-tenu des résultats encourageants en terme de rendement et d'énantiosélectivité.

Parallèlement à ces travaux, les réactions d'aldolisation en milieu aqueux avaient été initiées. Cette approche présentait l'avantage de ne pas utiliser de groupements protecteurs sur les oligomères de chitosane qui pouvaient influencer les rendements de réaction.

III.C.2. L'organocatalyse en milieu aqueux

L'eau présente un solvant idéal pour réaliser des réactions chimiques vu sa grande abondance sur la planète et sa non-toxicité. De part ses propriétés, il est considéré comme un "solvant vert". L'utilisation de ce solvant permet de solubiliser les catalyseurs possédant des fonctions alcools mais pas les composés de départ ce qui conduit à réaliser une réaction à l'interface entre deux milieux.

Des réactions d'aldolisation énantiosélectives réalisées dans l'eau en présence de la (*S*)-proline supportée soit sur la glucosamine¹⁹⁸ soit sur le chitosane¹⁹⁹ ont été décrites dans la littérature. Nous présentons ci-dessous les réactions d'aldolisation réalisées avec les dérivés de glucosamine et les oligomères de chitosane dont la fonction amine primaire joue le rôle de site catalytique.

III.C.2.a. La réaction d'aldolisation dans l'eau en présence des catalyseurs de type thioglycoside

La réaction d'aldolisation entre la cyclohexanone et le 4-nitrobenzaldéhyde est réalisée en présence du β -thiochitobioside **183**. Les conditions réactionnelles que nous avons appliquées sont une concentration en organocatalyseur de 0.04 M, un excès de cyclohexanone (14 équivalents) ce qui lui confère un double rôle de réactif et de solvant, en présence ou non de co-catalyseur.

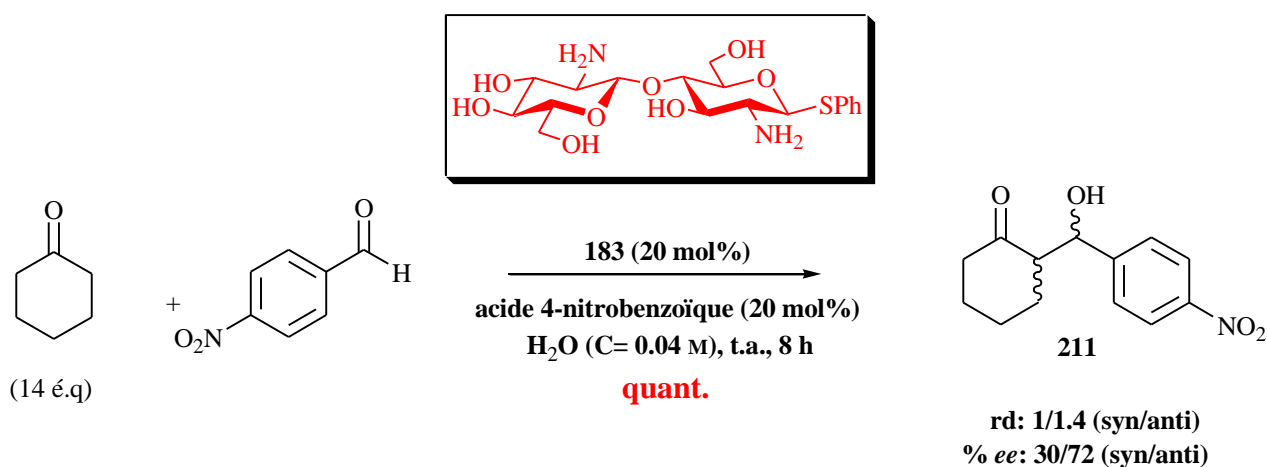


Schéma 131

La réaction réalisée sans co-catalyseur acide nécessite plusieurs jours pour obtenir une conversion totale. Par contre, ce temps est très largement réduit en présence de 20 mol% d'acide 4-nitrobenzoïque puisqu'au bout de 8 heures de réaction, la conversion est totale et le rendement en produits d'aldolisation est quantitatif. La réaction est peu diastéréosélective puisque le rapport

¹⁹⁸ M. De Nisco, S. Pedatella, S. Bektaş, A. Nucci, R. Caputo, *Carbohydr. Res.* **2012**, 356, 273-277.

¹⁹⁹ H. Zhang, W. Zhao, J. Zou, Y. Liu, R. Li, Y. Cui, *Chirality* **2009**, 21, 492-496.

Catalyse énantioselective par les oligomères de chitosane

diastéréoisomérique est légèrement en faveur de l'isomère *anti*. Par contre, l'excès énantiomérique de 72% pour le diastéréoisomère *anti* commence à être intéressant.

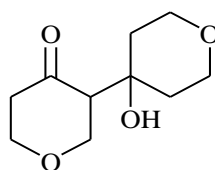
Suite à ces résultats encourageants, la réaction d'aldolisation a été étendue, en présence d'acide, à d'autres cétones cycliques ou acycliques dont les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

entrée	t (h)	produit	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	8	 212	2.4/1	36/35	70 (100) ^d
2	24	 213	1/1.9	-54	100
3	8	 214	3.6/1	-	100
4	24	 215	1/1.1	19/38	100
5	24	 216	1/1	31/29	61
6	24	 217	2.3/1	72/33	42
7	24	 180	-	19	92 (100)

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale (*ee* produits purifiés), ^c Rdts déterminés par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde, ^d Valeurs entre parenthèse indiquent la conversion

Tableau 30

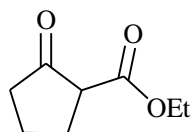
Dans la majorité des cas, les rendements en produits d'aldolisation sont bons et varient de 61 à 100%. La réaction avec la 3-pentanone s'avère plus lente et les adduits sont isolés, après 24 heures, avec seulement 42% de rendement (entrée 6). D'autre part, les réactions se révèlent peu dia- et stéréosélectives. Il est important de noter que les meilleurs excès énantiomériques sont obtenus avec la cyclohexanone et la pentan-3-one. Par contre, les produits d'aldolisation résultant de la réaction entre la cyclohexanone et le 4-oxotétrahydropyrane (entrée 3), sont isolés sous forme racémique révélant ainsi une induction asymétrique nulle. Il est encore intéressant de remarquer que cette réaction conduit également à la formation d'un produit d'auto-aldolisation **218**, isolé avec un rendement de 26%, un cas rare ou non reporté en organocatalyse.



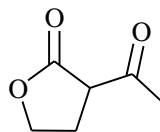
218

Schéma 132

Lorsque la réaction est effectuée en présence des cétones **219** et l' α -acétyl- γ -butyrolactone **220**, aucun adduit n'est détecté, même après 24 h de réaction.



219

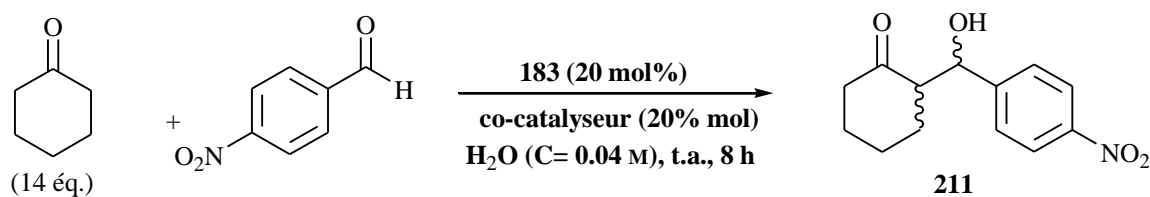


220

Schéma 133

La différence de solubilité entre les composés de départ et les produits d'aldolisation, solubles en milieu organique, et le catalyseur, soluble en phase aqueuse, nous ont encouragé à explorer le recyclage éventuel de ce catalyseur. L'extraction des adduits est réalisée par l'addition du 2-méthyltétrahydrofurane, solvant dans lequel les adduits et l'acide 4-nitrobenzoïque sont solubles. Les phases organiques sont ensuite traitées par une solution aqueuse de NaHCO_3 afin de neutraliser l'acide et éviter ainsi les produits de crotonisation.

Après chaque cycle, les mêmes quantités des réactifs et d'acide 4-nitrobenzoïque sont ajoutées à la phase aqueuse contenant l'organocatalyseur (Tableau 31).



essai	<i>syn/anti</i>	% <i>ee</i> (<i>syn/anti</i>)	Rdt (%)
1	1/1.5	44/87	100
2	1/1.9	51/86	100
3	1/1.8	59/88	90
4	1/1.9	61/86	88
5	1/1.9	63/89	62
6	1/2	65/87	18

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts déterminés par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde

Tableau 31

Nous avons ainsi montré que le recyclage du catalyseur pouvait être réalisé six fois sans perte de sélectivité. L'augmentation des excès énantiomériques comparés à ceux décrits dans le schéma 131 résulte sûrement de la pureté de l'organocatalyseur. En effet, la seule différence entre les deux expériences réside dans la provenance du catalyseur, issu de deux lots de synthèse différents. Une chute de rendement (18%) est observée au bout du sixième essai. L'évaporation de la phase aqueuse en but de récupérer l'organocatalyseur **183** révèle l'absence totale de ce dernier. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse, qu'à chaque cycle catalytique, une petite partie de catalyseur est extraite avec le 2-méthyltétrahydrofurane. Si cette hypothèse est fondée, ce résultat nous indique également qu'une quantité plus faible de catalyseur peut être utilisée sans affecter l'éntio- et la diastéréosélectivité. Cependant, ces expériences de recyclage devront être répétées afin de confirmer ces résultats. Il serait également intéressant de changer de réactifs entre les différents cycles.

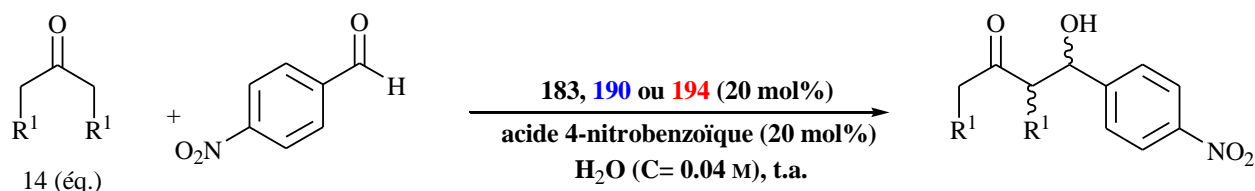
Afin de déterminer le rôle du degré de polymérisation sur la sélectivité de la réaction d'aldolisation, celle-ci a été étendue au monomère et au trimère correspondant.

Influence du degré de polymérisation

Les principaux résultats en présence du monomère **194** et du trimère **190** sont représentés ci-dessous. Certaines cétones ont été exclues soit parce qu'elles étaient solides (comme la

Catalyse énantioselective par les oligomères de chitosane

cyclooctanone et la tétrahydro-4H-thiopyran-4-one) soit parce qu'elles conduisaient à des produits d'auto-aldolisation. Un code couleur a été adopté afin de comparer les résultats : en rouge les résultats obtenus avec le monomère, en bleu ceux avec le trimère et en noir ceux avec le dimère.



entrée	t (h)	produit	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	Rdt (%) ^c
1	8		2.2/1	46/37	70 (100) ^d
			2.4/1	36/35	70 (100)
			2.3/1	38/30	76 (100)
2	8		1/1.3	8/72	100
			1/1.4	30/72	100
			1/1.7	52/77	100
3	24		1/1	53/22	47
			1/1.1	19/38	100
			1/1.1	10/41	88
4	24		2/1	n.d/57	16
			2.3/1	72/33	42
			1.9/1	n.d/18	42

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts déterminés par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde, ^d Les valeurs entre parenthèse indiquent la conversion

Tableau 32

Avant d'analyser les résultats, nous n'avons pas pu déterminer l'excès énantiomérique de l'adduit aldolique *syn* résultant de la réaction en présence de la pentan-3-one pour cause du chevauchement du pic en HPLC avec celui de l'aldéhyde. De plus, ces résultats ne représentent qu'une seule série d'expériences qui devra être confirmée.

D'une manière générale, les rendements des réactions sont bons et deviennent quantitatifs en présence des cétones cycliques. Les résultats nous montrent également que, pour les cétones les moins réactives (entrées 3 et 4), l'oligomérisation permet d'améliorer les rendements. Ainsi, en présence de chitobiose, les rendements sont doublés. Cependant, comparé au dimère, l'utilisation du trimère n'apporte pas de réelles améliorations. De plus, quelque soit le catalyseur utilisé, les rapports diastéréoisomériques sont toujours du même ordre de grandeur. Il est intéressant de noter que l'influence de l'oligomérisation, liée à la présence de plusieurs sites de catalyse possibles, sur

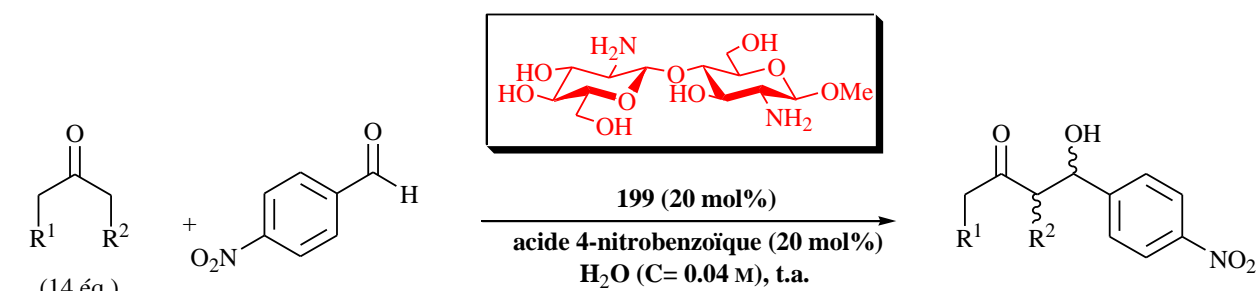
les excès énantiomériques est surtout visible pour les adduits *syn*. En effet, les rendements des réactions en présence de cyclohexanone sont identiques avec le dimère **183** et le trimère **190**. L'excès énantiomérique pour le diastéréoisomère *anti* est identique (72-77% *ee*) alors qu'il augmente sensiblement pour le diastéréoisomère *syn* en fonction de l'oligomérisation. En effet il augmente de 8 à 52% (entrée 2). Par contre, en présence de la pentan-3-one, les excès énantiomériques pour le diastéréoisomère *anti* diminuent en fonction du degré d'oligomérisation. En effet, ils chutent de 57% à 18% en présence du chitotriose **190** (entrée 4). Nous n'avons pas pu déterminer l'influence sur le diastéréoisomère *syn*.

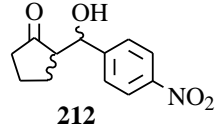
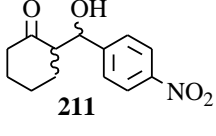
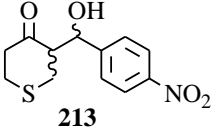
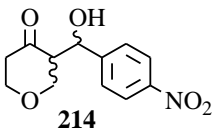
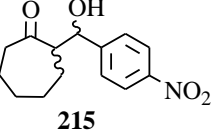
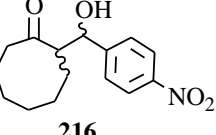
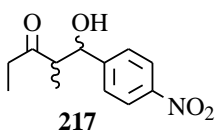
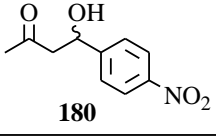
Dans le but d'estimer l'influence de la seconde unité de glucosamine nous aurions pu envisager de protéger sélectivement la fonction amine de l'unité non réductrice. Malheureusement, la synthèse de cette molécule nécessiterait plusieurs étapes réactionnelles à partir des monomères judicieusement protégés.

III.C.2.b. La réaction d'aldolisation dans l'eau en présence des catalyseurs de type méthylglycoside

Nous avons ensuite essayé de déterminer si la partie aglycone avait une influence sur la sélectivité de la réaction d'aldolisation. Comme précédemment, nous avons réalisé notre étude en présence du 4-nitrobenzaldéhyde comme entité électrophile et du β -méthylchitosane **199** comme catalyseur (Tableau 33).

Catalyse énantioselective par les oligomères de chitosane



entrée	t (h)	produit	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	rdt (%) ^c
1	8	 212	2.3/1	30/18	71 (100) ^d
2	8	 211	1/1.5	41/80	100
3	24	 213	1/1.8	43/32	81
4	8	 214	2.3/1	3/3	100
5	24	 215	1.4/1	4/25	24
6	24	 216	-	-	-
7	24	 217	1.2/1	n.d/2	13
8	24	 180	-	15	67

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts déterminés par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde, ^d Les valeurs entre parenthèse indiquent la conversion

Tableau 33

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

Les rendements de la réaction varient de 13 à 100%. Ces résultats montrent que cet organocatalyseur est un peu moins actif que son analogue thiophényle **183**. Par exemple, les rendements des réactions impliquant la cycloheptanone, la cyclooctanone, la pentan-3-one ou l'acétone diminuent de manière significative en présence de ce catalyseur. Pour chacune des cétones utilisées, les rapports diastéréoisomériques sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec l'analogue thiophényle **183**. Les excès énantiomériques sont très modestes voire nuls dans certains cas. Le meilleur excès obtenu est celui obtenu pour l'adduit *anti* résultant de la réaction avec la cyclohexanone. Les rapports diastéréoisomériques et les excès énantiomériques obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec l'analogue thiophényle ce qui nous fait penser que la partie aglycone a peu d'influence sur la sélectivité de la réaction d'aldolisation.

Influence du degré de polymérisation

Nous avons ensuite comparé l'induction asymétrique du monomère par rapport au dimère (Tableau 34).

203 (20 mol%)
acide 4-nitrobenzoïque (20 mol%)
H₂O (C= 0.04 M), t.a.

entrée	t (h)	produit	syn/anti ^a	% ee (syn/anti) ^b	rdt (%) ^c
1	8	 212	1.8/1	4/3	76 (100) ^d
2	8	 211	1/1.8	9/9	92 (100)
3	24	 215	-	-	-
4	24	 217	-	-	-

^a Déterminé par RMN ¹H, ^b Déterminé par analyse HPLC chirale, ^c Rdts déterminé par étalonnage interne avec le 4-méthoxybenzaldéhyde, ^d Les valeurs entre parenthèse indiquent la conversion

Tableau 34

La comparaison des deux catalyseurs met en évidence que le monomère est moins actif que le dimère correspondant. En effet, aucun adduit n'est détecté en présence de la cycloheptanone et la pentan-3-one alors que les rendements de la réaction catalysée avec le dimère **199** sont, respectivement de 24 et 13%. Même si les rapports diastéréoisomériques sont sensiblement identiques, les excès énantiomériques sont eux très différents. En présence du β -méthylglucopyranoside **203**, les excès énantiomériques sont nuls alors que pour le dimère ces excès pouvaient atteindre la valeur de 80%. Contrairement à l'organocatalyseur de type thioéther, l'augmentation du nombre de fonction amine a une grande influence sur le rendement et sur l'énantiosélectivité de la réaction. Nous pouvons penser que les deux fonctions amine sont le siège de la catalyse. Pour infirmer cette hypothèse, il aurait fallu protéger sélectivement une des deux fonctions amine et étudier l'induction asymétrique de ce nouveau catalyseur. Mais la protection sélective d'une seule fonction amine s'avère compliquée. Nous avons également constaté que l'induction asymétrique est bien plus importante en présence du dimère que du monomère. Afin d'expliquer ce résultat, nous pouvons supposer que la seconde unité glucosamine encombre fortement une des faces de l'aldéhyde lors de l'état de transition.

Il est important de noter que nous avons mené une étude préliminaire sur les réactions d'aldolisation catalysées par le β -méthylglucopyranoside **203** entre la cétone ou la cyclohexanone et le 4-méthoxybenzaldéhyde dans la saumure. Ces conditions avaient été utilisées avec succès par l'équipe de Barbas.²⁰⁰ Nous pensions que la saturation de la phase aqueuse pouvait favoriser les interactions hydrophobes entre le catalyseur et les composés de départ augmentant ainsi la vitesse de réaction. Malheureusement, même en présence de l'acide 4-nitrobenzoïque comme co-catalyseur, nous n'avons pas observé d'adduits après 72 heures de réaction.

Nous avons montré que les catalyseurs possédant une partie aglycone de type OMe ou SPh avaient des comportements différents dans les réactions d'aldolisation asymétriques. En effet, le degré de polymérisation n'a que peu d'influence en présence du catalyseur possédant un groupement thioéther. Par contre, le fait d'introduire une seconde unité glucosamine sur la méthylglucosamine conduit à une augmentation importante des excès énantiomériques. Quelque soient les catalyseurs utilisés, la réaction s'est révélée peu diastéréosélective. Comparée aux résultats de la littérature,¹⁹³ l'utilisation de chitobiose **183** et de la méthylglucosamine **199** dans les réactions d'aldolisation asymétriques impliquant la cyclohexanone conduit à des conversions totales après 8 heures alors qu'en présence de chitosane, 24 heures de réaction sont nécessaires pour obtenir un rendement de 85%. Dans les deux cas, les excès énantiomériques sont du même ordre de grandeur.

III.C.2.c. Diverses réactions organocatalysées par 183 et 203

Nous avons choisi deux catalyseurs notamment le dimère **183** et le monomère **203** afin d'évaluer les réactions que ce type de molécule pouvait catalyser.

²⁰⁰ N. Mase, K. Watanabe, H. Yoda, K. Takabe, F. Tanaka, C. F. Barbas, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 4966-4967.

Réaction de Michael

Une série de réactions de Michael ont été réalisées. Elles mettent en jeu la cyclohexanone et le nitrostyrène **38** ou le *N*-benzyl maléimide **221** comme accepteurs de Michael.

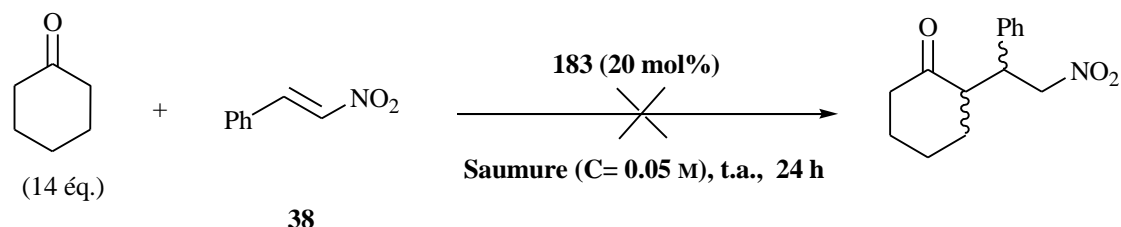
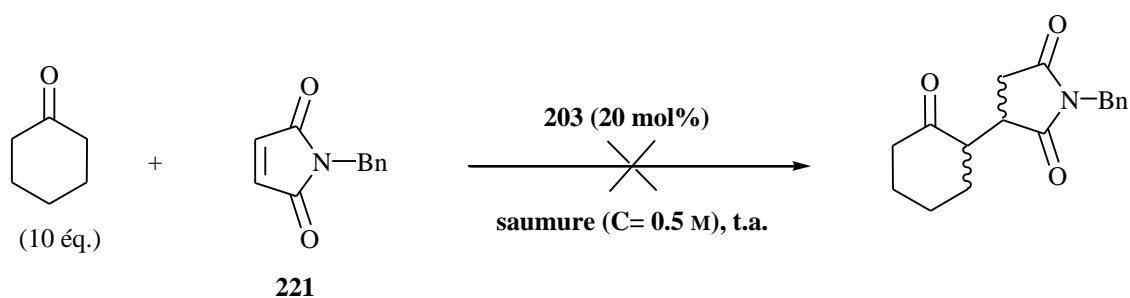


Schéma 134

Quelque soit l'accepteur de Michael utilisé ou le catalyseur **183** ou **203**, aucun produit d'addition n'est observé.



entrée	t (jours)	co-catalyseur (20 mol%)	syn/anti	% ee (syn/anti)	Rdt (%)
1	10	-	-	-	-
2	4	ac.4-nitrobenzoïque	-	-	-

Tableau 35

Réaction de Henry

La réaction de Henry consiste à condenser une espèce nitronate, générée *in situ* à partir d'un nitroalcane, et un composé carbonylé pour conduire à la formation d'un β -nitroalcool.²⁰¹

Nous avons évalué la réactivité du catalyseur **183** dans la réaction entre le nitrométhane **222** et le 4-nitrobenzaldéhyde (Schéma 135).

²⁰¹ Y. Alvarez-Casao, E. Marques-Lopez, R. P. Herrera, *Symmetry* **2011**, 3, 220-245.

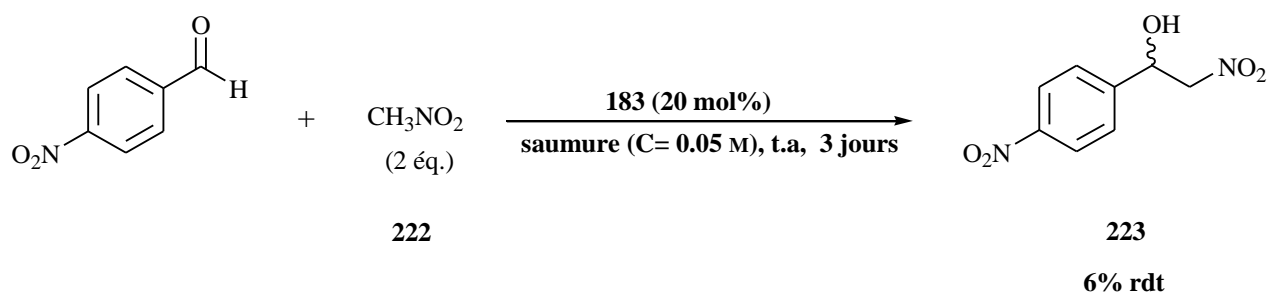
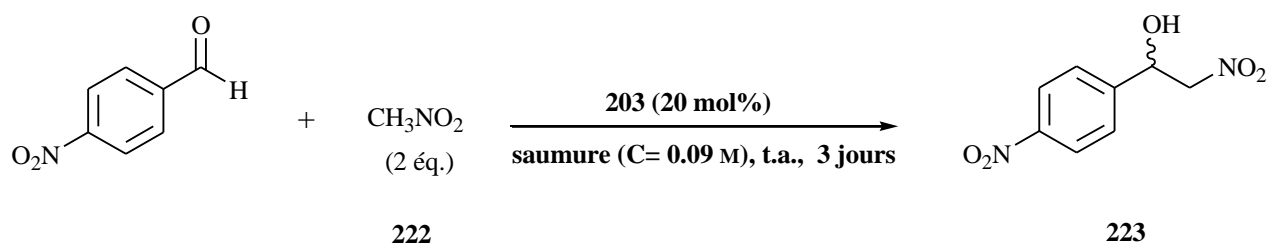


Schéma 135

Seuls 6% de produit de condensation ont été isolés après 3 jours de réaction à température ambiante. Par contre, de meilleures conversions sont obtenues avec le β-méthylglucopyranoside **203** mais aucune induction asymétrique n'est observée.



entrée	co-catalyseur (20 mol%)	% ee (syn/anti)	Rdt (%)
1	-	-	68
2	ac.4-nitrobenzoïque	2	23

Tableau 36

Le tableau 36 montre que l'ajout du co-catalyseur diminue le rendement en produit d'addition **223**. L'explication la plus probable est que l'ajout de l'acide diminue la concentration de l'ion nitronate, espèce nucléophile dans le milieu. En présence d'un acide, l'équilibre est déplacé vers la formation du nitrométhane **222**.

Réaction de Morita–Baylis–Hillman (MBH)

La réaction de Morita-Baylis-Hillman permet de créer une liaison carbone-carbone entre la position α d'un alcène activé et le carbone d'un électrophile, souvent un aldéhyde. Cette réaction est souvent catalysée par une amine tertiaire comme le DABCO. De nombreux organocatalyseurs sont capables de réaliser la réaction de "MBH" en version asymétrique. Citons le travail de Lu et

al.²⁰² utilisant les dérivés d'amine tertiaire du β -isocupreidine comme organocatalyseur asymétrique pour la réaction entre les isatines et différents acrylates dans la préparation des 3-hydroxy-2-oxindoles-3-substitués, motifs trouvés dans de nombreux produits naturels et ayant des propriétés thérapeutiques importantes.

Nous avons testé le catalyseur **183** dans la réaction du 4-nitrobenzaldéhyde et l'acrylate de méthyle **224**. Cela n'a pas conduit à la formation du produit désiré **225** malgré une concentration relativement élevée de catalyseur (Schéma 136).

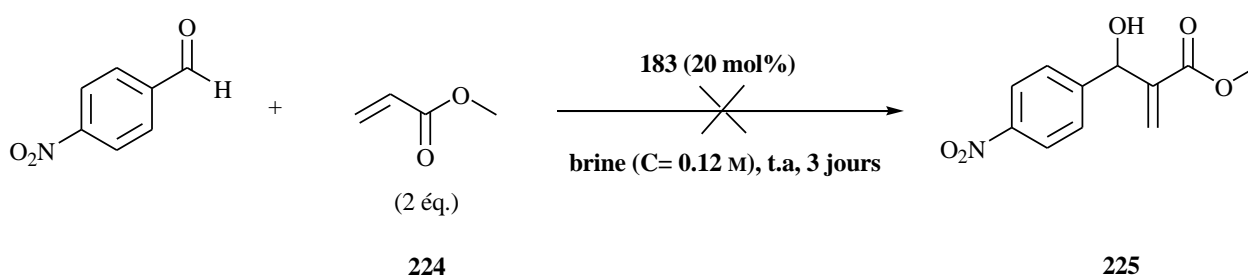


Schéma 136

Ces études préliminaires nous indiquent clairement la limite d'application de ces organocatalyseurs. Cependant, ces réactions ont été réalisées dans la saumure, solvant qui ne conduisait pas au meilleur rendement. Il serait intéressant de réitérer ces expériences dans l'eau.

III.D. Conclusion et perspectives

Cette partie a été consacrée à l'étude de l'induction asymétrique de dérivés de chitosane de taille définie en tant qu'organocatalyseurs chiraux dans les réactions classiques de la chimie organique telles que la réaction d'aldolisation, de Michael et d'Henry. Nous avons montré que les dérivés de chitosane pouvaient catalyser les réactions d'aldolisation asymétriques en milieu aqueux et qu'un recyclage du catalyseur pouvait être envisagé sans perdre son activité. Le degré de polymérisation semble avoir un fort impact sur l'énantiosélectivité de la réaction en présence des catalyseurs possédant un groupement méthoxy en position anomérique contrairement à leurs analogues thiophényle. Nous avons également montré que le champ d'application de ces catalyseurs était limité puisque les réactions de Michael, d'Henry et de Moroiita-Baylis-Hillman organocatalysées se sont révélées infructueuses.

L'impact de la présence de plusieurs sites amine primaire sur la stéréosélectivité peut être révélé en synthétisant des organocatalyseurs possédant une seule fonction amine protégée par un groupement protecteur.

Les organocatalyseurs dérivés de la glucosamine ou des oligomères de chitosane sont plus actifs lorsque ces derniers sont protégés avec des groupements électrodonneurs. Ainsi, le travail devra s'orienter vers la synthèse de nouveaux catalyseurs substitués par des groupements

²⁰² F. Zhong, G.-Y. Chen, Y. Lu, *Org. Lett.* **2010**, *13*, 82-85.

Catalyse énantiosélective par les oligomères de chitosane

benzyle ou alkyle dans le but de les tester dans des réactions d'organocatalyse dans les solvants organiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette thèse, l'objectif principal était d'accéder à des oligomères de taille bien définie dérivés du chitosane comme organocatalyseurs substitués de la (*S*)-proline. Ces catalyseurs sont issus de la biomasse, et plus précisément de l'acétylase de la chitine. Afin de fonctionnaliser rapidement ces oligomères, des réactions de glycosylation sous activation micro-ondes ont été développées. Ainsi, une quantité catalytique de triflate de cuivre(II) (15-30 mol%) permet de catalyser ces réactions de glycosylation entre les dérivés peracétylés de la glucosamine, galactosamine ou du chitobiose de configuration α et différents accepteurs (i.e. alcools, thiols, phénol). Cette méthode non-conventionnelle de glycosylation présente l'avantage de conduire aux produits désirés en un temps court comparé au chauffage classique et d'être réalisée en absence d'atmosphère inerte quelque soient les accepteurs utilisés (alcools ou thiols). Malheureusement, lorsque l'accepteur est un sucre, aucune réaction de glycosylation n'est observée. Dans tous les cas, les produits glycosylés de configuration α sont obtenus majoritairement malgré la présence de la fonction acétamide, groupement participant, en position C-2. La diastéréosélectivité résulte d'une anomérisation *in situ* de l'isomère cinétique β . Cette méthodologie a été étendue avec succès aux dérivés du chitobiose ce qui nous a permis d'accéder à des précurseurs avancés de catalyseurs se différenciant par leur partie aglycone (éther ou thioéther).

De part la présence de plusieurs fonctions alcools sur le chitosane, des catalyseurs solubles soit en milieux organiques soit en milieu aqueux ont été synthétisés en peu d'étapes. Une séquence réactionnelle simple, qui requiert un minimum d'étape de purification, a été mise au point pour la synthèse des oligomères et monomères complètement déprotégés.

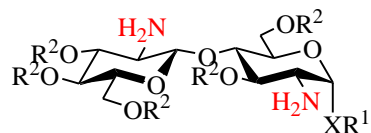
Les différents résultats des réactions d'aldolisation réalisées en solvant organique nous ont permis de conclure que la présence de groupements protecteurs électroattracteurs (i.e. acétyle) a un effet négatif sur la réactivité des catalyseurs contrairement aux groupements électrodonneurs (i.e. TBS). En effet, en présence d'éthers *tert*-butyldiméthylsilyle, la réactivité et la sélectivité sont nettement améliorées.

Par contre, les résultats les plus prometteurs que nous avons obtenus utilisent des organocatalyseurs solubles dans l'eau. Nous avons montré que les dimères se sont révélés les plus performants pour la catalyse énantiosélective de la réaction d'aldolisation impliquant différentes cétones (linéaire et cyclique) et le 4-nitrobenzaldéhyde en présence de l'acide 4-nitrobenzoïque comme co-catalyseur. Un temps réactionnel de 8 à 24 heures est suffisant pour obtenir des rendements quantitatifs dans la plupart des cas. Les meilleurs excès énantiomériques que nous avons obtenu sont de 89% pour l'adduit *anti* résultant de la réaction d'aldolisation avec la cyclohexanone. Nous avons également montré que l'organocatalyseur pouvait être réutilisé dans plusieurs cycles catalytiques sans perte d'activité. Bien que nous n'ayons pas pu déterminer l'influence d'un second site catalytique sur le chitobiose, l'utilisation du chitotriose n'apporte pas de réelles améliorations. De plus, l'utilisation du dimère représente une alternative intéressante au chitosane qui est peu soluble dans l'eau.

En perspective, compte-tenu de la plus grande réactivité des catalyseurs monomériques de configuration α comparée à leurs analogues β , nous proposons de synthétiser et d'utiliser des

Conclusion générale

dimères possédant une partie aglycone de configuration α comme le montre le schéma ci-dessous :



$X = S, O.$

$R^1 = Me, Ph, TBS$

$R^2 = H, Me, Bn, TBS$

La méthode de glycosylation par activation micro-ondes que nous avons développée permettrait d'accéder rapidement à ces structures.

Le travail que j'ai réalisé m'a permis de valoriser la biomasse et cela en montrant que la chitine, le second polysaccharide le plus abondant sur notre planète, peut être utilisée pour fournir des produits utiles en organocatalyse énantiosélective.

Experimental section

Experimental section

1. General informations

All air sensitive reactions were carried out under an argon atmosphere in oven-dried glassware.

Solvents:

- Methanol was dried over 3 Å molecular.
- Pyridine was dried over potassium hydroxide.
- Tetrahydrofuran was distilled over sodium-benzophenone in a continuous still under an argon atmosphere.
- Dichloromethane and acetonitrile were dried by passing through a column of activated alumina (dry solvent station GT S100, Glass Technology®).
- Other solvents such as acetone and DMSO were used as supplied by commercial sources.

Chromatography:

Analytical thin layer chromatography (TLC) was performed on silica gel 60 F254 sheets (Merck) and visualized using combination of UV (250 nm), orcinol, potassium permanganate or phosphomolybdic acid staining. Flash column chromatography was performed using 35-70 µm silica gel (SDS 60 ACC) as the stationary phase.

NMR:

NMR spectra were recorded on Brüker DPX 250, AV300, AV360 NMR or DRX-400 spectrometers at room temperature. Data for ¹H NMR spectra were reported as follows: chemical shifts (δ ppm) (multiplicity, coupling constant (Hz), integration. Chemical shifts were determined relative to internal CHCl₃ (¹H, δ = 7.26), CDCl₃ (¹³C, δ = 77.10), CHD₂OD (¹H, δ = 3.31), CD₃OD (¹³C, δ = 49.15), CHD₂COCD₃ (¹H, δ = 2.04), (CD₃)₂CO (¹³C, δ = 29.8), DMSO-d₆ (¹H, 2.50), DMSO-d₆ (¹³C, δ = 39.50), HOD (¹H, δ = 4.80). The following abbreviations were used for the multiplicities: app (apparent), br (broad), s (singlet), d (doublet), t (triplet), q (quadruplet), m (multiplet).

The CDCl₃ for all NMR experiments was neutralized over dried Na₂CO₃.

Mass spectra:

Low and high-resolution mass spectra (positive ESI mode) were recorded respectively on Thermo Scientific TSQ and Brüker Daltonics MicrOTOF-QII mass spectrometers. Chemical ionization (CI) was performed by direct introduction on a Thermo Scientific DSQ mass spectrometer.

Melting point:

Melting points were determined in capillary tubes with a Stuart Melting point apparatus SMP10.

Optical rotation:

Experimental section

Optical rotations were measured on a Jasco DIP-370 polarimeter using a 100 mm path-length cell at 589 nm.

HPLC Analysis:

Chiral HPLC analyses were performed by Jasco chromatograph using CHIRALPAK IB, CHIRALPAK IA, CHIRALPAK AD-H or CHIRALCEL OJ-H columns with hexane-isopropyl alcohol or hexane-ethyl alcohol as the eluting solvents.

2. Experimental section for Chapter II

- **General procedures**

Procedure 1: Microwave-assisted glycosylation reactions from α -per-*O*-acetylated *N*-acetylglucosamine (82)

In a microwave vial equipped with a stirring bar, were added α -peracetylated *N*-acetylglucosamine **82** (50 mg, 1 eq., 0.128 mmol), Cu(OTf)₂ (7 mg 0.15eq., 0.0193 mmol), the acceptor (4 eq.) and 1 mL of dichloroethane (DCE). The mixture was heated to 100°C under microwave irradiation (CEM DISCOVER®) for 40 minutes. After this time, a TLC analysis shows no further conversion. The mixture was cooled to room temperature, diluted with CH₂Cl₂, and the organic layer was washed with an aqueous 1M HCl solution (2 x 20 mL). The combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated under reduced pressure. The crude residue was purified by column chromatography on silica gel (toluene-acetone) to afford the corresponding glycosides.

Procedure 2: Microwave-assisted glycosylation reactions from α -per-*O*-acetylated *N,N'*-diacetylchitobiose (78)

In a microwave vial equipped with a stirring bar, were added α -peracetylated chitobiose **78** (50 mg, 1eq., 0.0737 mmol), Cu(OTf)₂ (8 mg, 0.3eq., 0.0222 mmol), the acceptor (4 eq.) and 1 mL of dichloroethane (DCE). The mixture was heated to 100°C under microwave irradiation (CEM DISCOVER®) for an appropriate time. The resulting mixture was cooled to room temperature, diluted with CH₂Cl₂, and the organic layer was washed with an aqueous 1M HCl solution (2 x 20 mL). The combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated under reduced pressure. The crude residue was purified by column chromatography on silica gel (toluene-acetone) to give the desired glycosides.

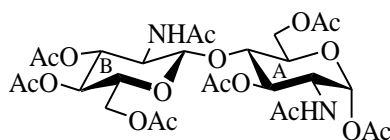
Procedure for chitin depolymerisation

Chitin (60.0 g) was added portion-wise to an ice-cold mixture of acetic anhydride (300 mL) and sulfuric acid (30 mL). The suspension was stirred at 55 °C for 3 h to give a brown mixture, kept at room temperature for 16 h and then heated at 55 °C for 1 h to give a homogenous solution. This mixture was then poured into an ice-cold solution of sodium acetate (120 g) in water (1.2 L).

Experimental section

The resulting solid was filtered off. The filtrate was extracted with dichloromethane (3×1.5 L). The combined organic layers were successively washed with water (4.5 L), an ice-cold saturated aqueous NaHCO₃ solution (4.5 L), and water (4.5 L). The organic layer was dried over Na₂SO₄, and the solvent was removed under reduced pressure to afford a yellow solid (46.7 g). The residue was purified by silica gel chromatography (dichloromethane/acetone: from 9/1 to 1/9) to afford six fractions. The first one, a UV active product, was identified as the α,β -unsaturated aldehyde **81**²⁰³ from acetylated glucosamine and the second one as 2-acetamido-1,3,4,6-tetra-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranose **82** (2.90 g, 2.5%). The next two fractions, which were recrystallized from MeOH/Et₂O, were respectively identified as dimer **78** (4.12 g, 4.1%) and trimer **79** (1.62 g, 1.7%).

(2-Acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-1,3,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranose (**78**)²⁰⁴



¹H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 6.08 (d, $J_{1A,2A} = 9.8$ Hz, 1H, H-1_A), 6.04 (d, $J_{NH,2B} = 9.1$ Hz, 1H, NH_B), 5.71 (d, $J_{NHA,2A} = 9.1$ Hz, 1H, NH_A), 5.21 (dd, $J_{3A,4A} = 9.4$, $J_{3A,2A} = 10.9$ Hz, 1H, H-3_A), 5.12 (t, $J_{3B,4B} = J_{3B,2B} = 9.5$, 1H, H-3_B), 5.04 (t, $J_{4B,3B} = J_{4B,5B} = 9.5$, 1H, H-4_B), 4.47 (d, $J_{1B,2B} = 8.2$ Hz, H-1_B), 4.45 (dd, $J_{6A,6A} = 12.7$ Hz, $J_{6A,5A} = 3.2$ Hz, 1H, H-6_A), 4.40 (dd, $J_{6B,6B} = 11.8$ Hz, $J_{6B,5B} = 3.9$ Hz, 1H, H-6_B), 4.36 (ddd, $J_{2A,3A} = 10.9$ Hz, $J_{2A,NHA} = 9.1$ Hz, $J_{2A,1A} = 3.6$ Hz, 1H, H-2_A), 4.17 (dd, $J_{6A,6A} = 12.7$ Hz, $J_{6A,5A} = 2$ Hz, 1H, H-6_A), 4.01 (dd, $J_{6B,6B} = 11.8$ Hz, $J_{6B,5B} = 2.3$ Hz, 1H, H-6_B), 4.03-3.99 (m, 1H, H-2_B), 3.96-3.89 (m, 1H, H-5_A), 3.77 (t, $J_{4A,3A} = J_{4A,5A} = 9.4$, H-4_A), 3.65 (ddd, $J_{5B,4B} = 9.5$ Hz, $J_{5B,6B} = 3.9$ Hz, $J_{5B,6B} = 2.3$ Hz, 1H, H-5_B), 2.22 (s, 3H, OCOCH₃), 2.18 (s, 3H, OCOCH₃), 2.11 (s, 3H, OCOCH₃), 2.09 (s, 3H, OCOCH₃), 2.04 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.96 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 171.2 (CO), 170.8 (CO), 170.5 (CO), 170.4 (CO), 170.1 (CO), 169.2 (CO), 168.9 (CO), 101.7 (C-1_B), 90.5 (C-1_A), 75.9 (C-4_A), 72.6 (C-3_B), 71.9 (C-5_B), 70.8 (C-3_A), 70.7 (C-5_A), 67.9 (C-4_B), 61.7 (C-6_B), 61.5 (C-6_A), 54.5 (C-2_B), 51.2 (C-2_A), 23.2 (CH₃CO), 23.0 (CH₃CO), 20.9 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

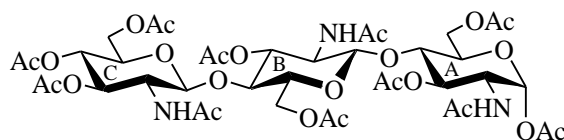
HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₈H₄₀N₂NaO₁₇[M+Na]⁺: 699.2219; found: 699.2206.

Mp: 305-307°C (MeOH/Et₂O).

²⁰³ E. W. Thomas, *Carbohydr. Res.* **1974**, *33*, 175-177.

²⁰⁴ K. Matsuoka, Y. Matsuzawa, K. Kusano, D. Terunuma, H. Kuzuhara, *Biomacromolecules* **2000**, *1*, 798-800.

(2-Acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(2-acetamido-3,6-di-O-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-1,3,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-α-D-glucopyranose (79)²⁰⁵:



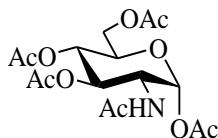
¹H NMR (CDCl₃ + CD₃OD, 360 MHz) δ ppm: 5.98 (d, $J_{1A,2A} = 3.6$ Hz, 1H, H-1_A), 5.17-5.03 (m, 2H, H-3_A and H-3_C), 5.00-4.87 (m, 2H, H-3_B and H-4_C), 4.43 (d, $J_{1C,2C} = 8.7$ Hz, 1H, H-1_C), 4.32 (d, $J_{1B,2B} = 8.2$ Hz, 1H, H-1_B), 4.30-4.16 (m, 4H, H-2_A, H-6_A, H-6_B, H-6_C), 4.16-4.05 (m, 2H, H-6_B, H-6_B), 3.99-3.80 (m, 3H, H-6_A, H-5_A, H-2_B), 3.79-3.46 (m, 5H, H-4_A, H-4_B, H-2_C, H-5_C, H-5_B), 2.11 (s, 3H, OCOCH₃), 2.07 (s, 3H, OCOCH₃), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.93 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.85 (s, 9H, 3OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃ + CD₃OD, 90 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 171.3 (CO), 171.1 (CO), 171.0 (CO), 170.8 (CO), 170.7 (CO), 169.6 (CO), 168.2 (CO), 101.4 (C-1_B), 101.0 (C-1_C), 90.4 (C-1_A), 75.7 (C-4_B and C-4_A), 72.8 (C-3_B), 72.7 (C-5_B), 72.3 (C-3_C), 71.7 (C-5_C), 70.8 (C-3_A), 70.5 (C-5_A), 68.2 (C-4_C), 62.5 (C-6_A), 61.9 (C-6_B), 61.7 (C-6_C), 54.4 (C-2), 53.7 (C-2), 50.8 (C-2_A), 22.7 (CH₃CO), 22.5 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO), 20.4 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₄₀H₅₇N₃NaO₂₄[M+Na]⁺: 986.3224 found: 986.3231.

Mp > 310°C (MeOH/Et₂O).

2-Acetamido-1,3,4,6-tetra-O-acetyl-2-deoxy-α-D-glucopyranose (82)²⁰⁶



Acetic anhydride (35 mL, 372 mmol, 12 eq) was added to a solution of D-glucosamine hydrochloride **165** (7 g, 32.2 mmol) in pyridine (70 mL, 865.2 mmol, 27 eq). The reaction was stirred for 24 h at room temperature. Pyridine was then removed by coevaporation with toluene. The residue was diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was successively washed with an aqueous 1M HCl solution, a saturated aqueous NaHCO₃ solution and brine, dried over Na₂SO₄,

²⁰⁵ F. Nanjo, K. Sakai, T. Usui, I. Takai, Y. Ishido, *J. Carbohydr. Chem.* **1988**, 7, 67-82

²⁰⁶ J. E. Heidlas, W. J. Lees, P. Pale, G. M. Whitesides, *J. Org. Chem.* **1992**, 57, 146-151.

Experimental section

filtered and concentrated *in vacuo*. Compound **82** (11.2 g, 75%) was obtained as a white solid and used without further purification.

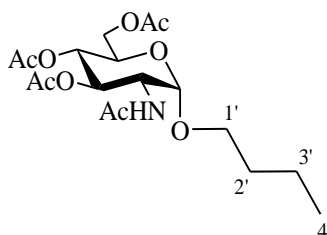
¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 6.15 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1), 5.63 (d, $J_{NH,2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.28-5.15 (m, 2H, H-3 and H-4), 4.55-4.39 (m, 1H, H-2), 4.23 (dd, $J_{6a,6b} = 12.5$ Hz, $J_{6a,5} = 3.9$ Hz, 1H, H-6a), 4.04 (dd, $J_{6b,6a} = 12.5$ Hz, $J_{6b,5} = 2.5$ Hz, 1H, H-6b), 4.01-3.92 (m, 1H, H-5), 2.17 (s, 3H, OCOCH₃), 2.07 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 1.92 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.8 (CO), 170.7 (CO), 170.0 (CO), 169.1 (CO), 168.7 (CO), 90.7 (C-1), 70.7 (C-3), 69.8 (C-5), 67.6 (C-4), 61.6 (C-6), 51.1 (C-2), 23.1 (CH₃CO), 21.0 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₆H₂₃NNaO₁₀ [$M+Na$]⁺: 412.1214; found: 412.1233.

Mp: 133-136 °C (MeOH/Et₂O).

Butyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (105)



According to procedure 1; 58% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 20/1$); $R_f = 0.34$ (80/20 Toluene/acetone)

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 5.67 (d, $J_{NH,2} = 9.5$ Hz, 1H, NH), 5.18 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 10.0$ Hz, 1H, H-3), 5.07 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 10.0$ Hz, 1H, H-4), 4.81 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1), 4.30 (ddd, $J_{2,3} = 10.0$ Hz, $J_{2,NH} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 3.7$ Hz, 1H, H-2), 4.20 (dd, $J_{6a,6b} = 12.2$ Hz, $J_{6a,5} = 4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.07 (dd, $J_{6b,6a} = 12.2$ Hz, $J_{6b,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 3.91 (ddd, $J_{5,4} = 10.0$ Hz, $J_{5,6a} = 4.5$ Hz, $J_{5,6b} = 2.3$ Hz, 1H, H-5), 3.66 (dt, $J_{1'a,1'b} = 10.0$ Hz, $J_{1'a,2'a} = 6.8$ Hz, 1H, H-1'a), 3.41 (dt, $J_{1'b,1'a} = 10.0$ Hz, $J_{1'b,2'b} = 6.8$ Hz, 1H, H-1'b), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.92 (s, 3H, OCOCH₃), 1.66-1.48 (m, 2H, H-2'), 1.43-1.28 (m, 2H, H-3'), 0.92 (t, $J_{4',3'a} = J_{4',3'b} = 7.3$ Hz, 3H, H-4').

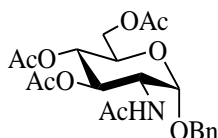
¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 97.1 (C-1), 71.4 (C-3), 68.2 (C-4 and C-1'), 67.7 (C-5), 62.1 (C-6), 51.9 (C-2), 31.3 (C-2'), 23.1 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 19.3 (C-3'), 13.7 (C-4').

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₈H₂₉NNaO₉ [$M+Na$]⁺: 426.1735; found: 426.1739.

Experimental section

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm, characteristic signal for β -anomer: 4.66 (d, $J = 8.3$ Hz, 1H, H-1).

Benzyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (106)²⁰⁷



According to procedure 1; 63% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 6/1$); $R_f = 0.50$ (70/30 Toluene/acetone)

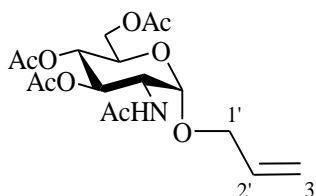
^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.46-7.27 (m, 5H, Ar-H), 5.65 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.5$ Hz, 1H, NH), 5.23 (dd, $J_{3,2} = 10.2$ Hz, $J_{3,4} = 9.6$ Hz, 1H, H-3), 5.13 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.6$ Hz, 1H, H-4), 4.94 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1), 4.71 (d, $J = 11.9$ Hz, 1H, $\text{CH}_2\text{-Ph}$), 4.52 (d, $J = 11.9$ Hz, 1H, $\text{CH}_2\text{-Ph}$), 4.35 (ddd, $J_{2,3} = 10.2$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 3.7$ Hz, 1H, H-2), 4.23 (dd, $J_{6a,6b} = 12.2$ Hz, $J_{6a,5} = 4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.03 (dd, $J_{6b,6a} = 12.2$ Hz, $J_{6a,5} = 2.7$ Hz, 1H, H-6b), 3.97 (ddd, $J_{5,4} = 9.6$ Hz, $J_{5,6a} = 4.5$ Hz, $J_{5,6b} = 2.7$ Hz, 1H, H-5), 2.10 (s, 3H, OCOCH_3), 2.02 (s, 3H, OCOCH_3), 2.00 (s, 3H, OCOCH_3), 1.89 (s, 3H, OCOCH_3).

^{13}C NMR (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 171.3 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 136.5, 128.7, 128.4, 128.2 (Ar-C), 96.7 (C-1), 71.3 (C-3), 70.2 ($\text{CH}_2\text{-Ph}$), 68.1 (C-4), 68.0 (C-5), 61.9 (C-6), 52.0 (C-2), 23.1 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{27}\text{NNaO}_9[M+\text{Na}]^+$: 460.1584; found: 460.1587.

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: characteristic signal for β -anomer: 4.65 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, H-1).

Allyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (107)²⁰⁸



According to procedure 1; 38% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 14/1$); $R_f = 0.30$ (70/30 Toluene/acetone)

²⁰⁷ K.-H. Chen, W.-F. Fang, Y.-T. Chen, J.-M. Fang, J.-T. Yang, *Chem. Eng. J.* **2012**, 198–199, 33-37.

²⁰⁸ E. Kamst, K. Zegelaar-Jaarsveld, G. A. van der Marel, J. H. van Boom, B. J. J. Lugtenberg, H. P. Spaink, *Carbohydr. Res.* **1999**, 321, 176-189.

Experimental section

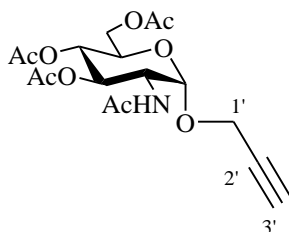
¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 5.88 (ddt, $J = 16.7$ Hz, $J = 10.4$ Hz, $J = 5.8$ Hz, 1H, H-2'), 5.72 (d, $J_{NH,2} = 9.5$ Hz, 1H, NH), 5.38-5.25 (m, 2H, 2H-3'), 5.22 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 10.2$ Hz, 1H, H-3), 5.11 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 10.2$ Hz, 1H, H-4), 4.87 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1), 4.34 (ddd, $J_{2,3} = 10.2$ Hz, $J_{2,3} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 3.6$ Hz, 1H, H-2), 4.22 (dd, $J_{6a,6b} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 4.6$ Hz, 1H, H-6a), 4.19-4.13 (m, 1H, H-1'a), 4.08 (dd, $J_{6b,6a} = 12.3$ Hz, $J_{6b,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 4.05-3.91 (m, 2H, H-5 and H-1'b), 2.08 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 133.1 (C-2'), 118.5 (C-3'), 96.4 (C-1), 71.4 (C-3), 68.8 (C-1'), 68.2 (C-4), 67.9 (C-5), 62.0 (C-6), 51.9 (C-2), 23.2 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₇H₂₅NNaO₉[M+Na]⁺: 410.1422; found: 410.1425.

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm, characteristic signal for β-anomer: 4.70 (d, $J = 8.3$ Hz, 1H, H-1).

Propargyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-α-D-glucopyranoside (108)²⁰⁹



According to procedure 1; 43% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 2.5/1$); $R_f = 0.26$ (70/30 Toluene/acetone)

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 5.72 (d, $J_{NH,2} = 9.6$ Hz, 1H, NH), 5.22 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.6$ Hz, 1H, H-3), 5.14 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.6$ Hz, 1H, H-4), 5.03 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1), 4.38 (td, $J_{2,3} = J_{2,NH} = 9.6$ Hz, $J_{2,1} = 3.6$ Hz, 1H, H-2), 4.30-4.18 (m, 3H, H-6a and 2H-1'), 4.09 (dd, $J_{6b,6a} = 12.7$ Hz, $J_{6b,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 3.99 (ddd, $J_{5,4} = 9.6$ Hz, $J_{5,6a} = 4.5$ Hz, $J_{5,6b} = 2.3$ Hz, 1H, H-5), 2.47 (t, $J_{3',1'} = 2.3$ Hz, 1H, H-3'), 2.09 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 1.96 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.3 (CO), 170.7 (CO), 170.0 (CO), 169.2 (CO), 96.3 (C-1), 78.2 (C-2') 75.5 (C-3'), 71.1 (C-3), 68.4 (C-5), 68.0 (C-4), 61.8 (C-6), 55.4 (C-1'), 51.6 (C-2), 23.2 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

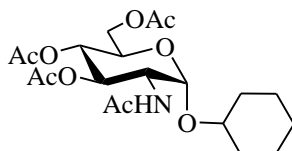
HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₇H₂₃NNaO₉[M+Na]⁺: 408.1271; found: 408.1278.

²⁰⁹ B. Roy, B. Mukhopadhyay, *Tetrahedron Lett.* **2007**, 48, 3783-3787.

Experimental section

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: characteristic signal for β -anomer: 4.85 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, H-1).

Cyclohexyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucofuranoside (109)²¹⁰



According to procedure 1; 71% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 22/1$); $R_f = 0.45$ (70/30 Toluene/acetone)

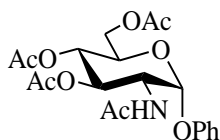
^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: 5.64 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.4$ Hz, 1H, NH), 5.20 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.8$ Hz, 1H, H-3), 5.08 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.8$ Hz, 1H, H-4), 4.96 (d, $J_{1,2} = 3.8$ Hz, 1H, H-1), 4.29 (ddd, $J_{2,3} = 9.8$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.4$ Hz, $J_{2,1} = 3.8$ Hz, 1H, H-2), 4.20 (dd, $J_{6a,6b} = 12.4$ Hz, $J_{6a,5} = 4.9$ Hz, 1H, H-6a), 4.13-3.98 (m, 2H, H-5 and H-6b), 3.61-3.48 (m, 1H, $\text{CH}_{\text{cyclohexyl}}$), 2.07 (s, 3H, OCOCH_3), 2.01 (s, 3H, OCOCH_3), 2.00 (s, 3H, OCOCH_3), 1.93 (s, 3H, OCOCH_3), 1.89-1.61 (m, 5H, $\text{CH}_2_{\text{cyclohexyl}}$), 1.60-1.10 (m, 5H, $\text{CH}_2_{\text{cyclohexyl}}$).

^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 95.6 (C-1), 76.7 ($\text{CH}_{\text{cyclohexyl}}$), 71.5 (C-3), 68.3 (C-4), 67.8 (C-5), 62.1 (C-6), 51.9 (C-2), 33.3, 31.6, 25.4, 24.1, 23.9 (5C, $\text{CH}_2_{\text{cyclohexyl}}$), 23.2 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{20}\text{H}_{31}\text{NO}_9[\text{M}+\text{Na}]^+$: 452.1891; found: 452.1920.

^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: characteristic signal for β -anomer: 4.85 (d, $J = 8.3$ Hz, 1H, H-1).

Phenyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucofuranoside (110)²¹¹



According to procedure 1; 32% as a yellow oil; $R_f = 0.30$ (70/30 Toluene/acetone)

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.38-7.29 (m, 2H, Ar-H), 7.13-7.02 (m, 3H, Ar-H), 5.85 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.57 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1), 5.44 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.6$ Hz, 1H, H-3), 5.21 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.6$ Hz, 1H, H-4), 4.52 (ddd, $J_{2,3} = 9.6$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.1$ Hz, $J_{2,1} = 3.6$ Hz, 1H, H-2).

²¹⁰ J.-i. Kadokawa, T. Nagaoka, J. Ebana, H. Tagaya, K. Chiba, *Carbohydr. Res.* **2000**, 327, 341-344.

²¹¹ B. Weissmann, *J. Org. Chem.* **1970**, 35, 1690-1691.

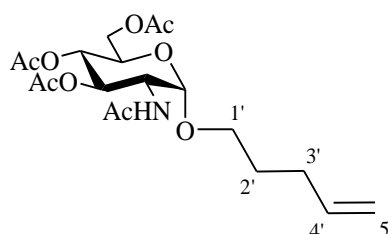
Experimental section

2), 4.21 (dd, $J_{6a,6b} = 12.6$ Hz, $J_{6a,5} = 5.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.10-3.99 (m, 2H, H-5 and H-6b), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.04 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 1.96 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.5 (CO), 170.6 (CO), 170.1 (CO), 169.3 (CO), 155.8, 129.8, 123.2, 116.4 (Ar-C), 95.7 (C-1), 71.1 (C-3), 68.5 (C-5), 67.9 (C-4), 61.7 (C-6), 52.0 (C-2), 23.2 (CH₃CO), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₀H₂₅NNaO₉ [$M+Na$]⁺: 446.1422; found: 446.1429.

4'-Pentenyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (111)



According to procedure 1; 70% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 12/1$); $R_f = 0.54$ (70/30 Toluene/acetone)

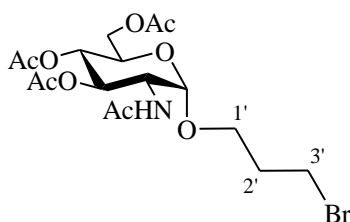
¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 5.81 (ddt, $J_{trans} = 16.8$ Hz, $J_{cis} = 10.0$ Hz, $J_{4',3'} = 6.6$ Hz, 1H, H-4'), 5.67 (d, $J_{NH,2} = 9.5$ Hz, 1H, NH), 5.20 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.8$ Hz, 1H, H-3), 5.10 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.8$ Hz, 1H, H-4), 5.07-4.97 (m, 2H, 2H-5'), 4.81 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1), 4.33 (ddd, $J_{2,3} = 9.8$ Hz, $J_{2,NH} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 3.7$ Hz, 1H, H-2), 4.22 (dd, $J_{6a,6b} = 12.2$ Hz, $J_{6a,5} = 4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.08 (dd, $J_{6b,6a} = 12.2$ Hz, $J_{6b,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 3.93 (ddd, $J_{5,4} = 9.8$ Hz, $J_{5,6a} = 4.5$ Hz, $J_{5,6b} = 2.3$ Hz, 1H, H-5), 3.70 (dt, $J_{1'a,1'b} = 10.1$ Hz, $J_{1'a,2'a} = 6.3$ Hz, 1H, H-1'a), 3.44 (dt, $J_{1'b,1'a} = 10.1$ Hz, $J_{1'b,2'b} = 6.3$ Hz, 1H, H-1'b), 2.22-2.11 (m, 2H, H-2'), 2.08 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃), 1.82-1.71 (m, 2H, 2H-3').

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 137.7 (C-4'), 115.3 (C-5'), 97.2 (C-1), 71.4 (C-3), 68.2 (C-4), 67.7 (C-5), 67.8 (C-1'), 62.1 (C-6), 51.9 (C-2), 30.3 (C-2'), 28.5 (C-3'), 23.2 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₉H₂₉NNaO₉ [$M+Na$]⁺: 438.1735; found: 438.1739.

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm, characteristic signal for β -anomer: 4.66 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, H-1).

3-Bromopropyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (112)



According to procedure 1; 57% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 10/1$); $R_f = 0.34$ (70/30 Toluene/acetone)

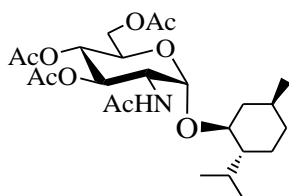
$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 5.71 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.18 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 10.0$ Hz, 1H, H-3), 5.10 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 10.0$ Hz, 1H, H-4), 4.85 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1), 4.33 (ddd, $J_{2,3} = 10$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.1$ Hz, $J_{2,1} = 3.7$ Hz, 1H, H-2), 4.23 (dd, $J_{6a,6b} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.10 (dd, $J_{6b,6a} = 12.3$ Hz, $J_{6b,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 3.95 (ddd, $J_{5,4} = 10.0$ Hz, $J_{5,6a} = 4.5$ Hz, $J_{5,6b} = 2.3$ Hz, 1H, H-5), 3.89 (dt, $J_{1'a,1'b} = 10$ Hz, $J_{1'a,2'a} = 5.8$ Hz, 1H, H-1'a), 3.57 (dt, $J_{1'b,1'a} = 10.0$ Hz, $J_{1'b,2'b} = 5.8$ Hz, 1H, H-1'b), 3.52 (t, $J_{3',2'} = 6.4$ Hz, 2H, H-3'), 2.21-2.12 (m, 2H, H-2'a), 2.09 (s, 3H, OCOCH_3), 2.02 (s, 3H, OCOCH_3), 2.01 (s, 3H, OCOCH_3), 1.95 (s, 3H, OCOCH_3).

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 97.3 (C-1), 71.2 (C-3), 68.1 (C-4), 67.9 (C-5), 65.8 (C-1'), 62.0 (C-6), 51.9 (C-2), 31.8 (C-2'), 29.9 (C-3'), 23.2 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{26}\text{NNaO}_9\text{Br}$ [$M+\text{Na}$] $^+$: 490.0683; found: 490.0679.

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm, characteristic signal for β -anomer: 4.58 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, H-1).

(+)-Menthyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (113)



According to procedure 1; 77% as a yellow oil; $R_f = 0.59$ (70/30 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: 5.64 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.4$ Hz, 1H, NH), 5.24-5.06 (m, 2H, H-3 and H-4), 5.01 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1), 4.31 (ddd, $J_{2,3} = 10.0$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.4$ Hz, $J_{2,1} = 3.7$ Hz, 1H, H-2), 4.22 (dd, $J_{6a,6b} = 12.5$ Hz, $J_{6a,5} = 4.2$ Hz, 1H, H-6a), 4.04 (dd, $J_{6b,6a} = 12.5$ Hz, $J_{6b,5} = 2.1$ Hz, 1H, H-6b), 4.01-3.93 (m, 1H, H-5), 3.43 (td, $J = 10.6$ Hz, $J = 4.1$ Hz, 1H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$),

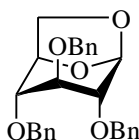
Experimental section

2.32-2.12 (m, 1H, CH_{menthyl}), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99-1.88 (m, 1H, CH_{2menthyl}), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃), 1.73-1.60 (m, 2H, CH_{2menthyl}), 1.43-1.21 (m, 2H, CH_{menthyl} and CH(CH₃)₂), 1.00-0.91 (m, 1H, CH_{2menthyl}), 0.94 (d, *J* = 6.8 Hz, 3H, CH₃), 0.89 (d, *J* = 6.8 Hz, 3H, CH₃), 0.86-0.79 (m, 1H, CH_{2menthyl}), 0.79-0.68 (m, 1H, CH_{2menthyl}), 0.75 (d, *J* = 6.8 Hz, CH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.2 (CO), 93.8 (C-1), 76.9 (CH_{menthyl}), 71.3 (C-3 or C-4), 68.4 (C-5), 68.0 (C-3 or C-4), 62.0 (C-6), 51.9 (C-2), 47.8 (CH_{menthyl} or CH(CH₃)₂), 40.2 (CH₂), 34.2 (CH₂), 31.3 (CH_{menthyl} or CH(CH₃)₂), 25.5 (CH_{menthyl}) 23.1 (CH₃CO), 22.6 (CH₂), 22.2 (CH₃), 21.1 (CH₃), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 15.0 (CH₃).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₂₄H₃₉NNaO₉[*M*+Na]⁺: 508.2517; found: 508.2521.

1,6-anhydro-2,3,4-tri-*O*-benzyl-β-D-glucopyranose (131)²¹²



Isolated from the reaction between α-per-*O*-acetylated *N*-acetylglucosamine and methyl 2,3,4-tri-*O*-benzyl-α-D-glucopyranoside according to the procedure 1; Yield 63%, **R_f** = 0.30 (80/20 Cyclohexane/EtOAc)

¹H NMR (CDCl₃, 360MHz) δ ppm: 7.44-7.21 (m, 15H, Ar-H), 5.48 (s, 1H, H-1), 4.64-4.58 (m, 1H, H-5), 4.64 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 4.60 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 4.58 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 4.55 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 4.48 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 4.42 (d, *J* = 12.4 Hz, 1H, CHPh), 3.92 (d, *J* = 7.0 Hz, 1H, H-6a), 3.69 (dd, *J*_{6b,6a} = 7.0 Hz, *J*_{6b,5} = 5.7 Hz, 1H, H-6b), 3.61 (bs, 1H, H-3), 3.39-3.35 (m, 2H, H-4 and H-2).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 138.0, 137.9, 128.5, 128.0, 127.9, 127.8 (Ar-C), 100.7 (C-1), 77.0, 76.3, 76.2 (3C, C-2, C-3 and C-4), 74.5 (C-5), 72.1, 71.8, 71.3 (3C, 3CH₂), 65.5 (C-6).

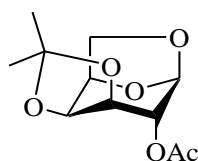
HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₂₇H₂₈NaO₅ [*M*+Na]⁺: 455.1829; found: 455.1835.

Mp: 90-91 °C

[α]_D²⁴: -27.4 (*c* 1, CHCl₃).

²¹² S. A. Thadke, S. Hotha, *Tetrahedron Lett.* **2010**, *51*, 5912-5914.

2-O-Acetyl-1,6-anhydro-3,4-O-isopropylidene- β -D-galactopyranose (132)²¹³



Isolated from the reaction between **82** and 1,2:3,4-di-*O*-isopropylidene-D-galactopyranoside according to the procedure 1; Yield 4%, $R_f = 0.50$ (90/10 Toluene/acetone)

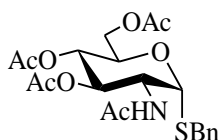
¹H NMR (CDCl₃, 360MHz) δ ppm: 5.35 (s, 1H, H-1), 4.88 (s, 1H, H-2), 4.53 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 6.1$ Hz, 1H, H-4), 4.43 (t, $J_{5,4} = J_{5,6b} = 6.1$ Hz, 1H, H-5), 4.17-4.08 (m, 2H, H-3 and H-6a), 3.60 (dd, $J_{6b,6a} = 7.7$ Hz, $J_{6b,5} = 6.1$ Hz, 1H, H-6b), 2.12 (s, 3H, OCOCH₃), 1.54 (s, 3H, CH₃), 1.33 (s, 3H, CH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 169.6 (CO), 109.0 (C_q), 99.0 (C-1), 74.0 (C-3), 72.2 (C-5), 71.5 (C-2), 69.2 (C-4), 63.4 (C-6), 25.8 (CH₃), 24.3 (CH₃), 21.0 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₁H₁₆NaO₆ [$M+Na$]⁺: 267.0839; found: 267.0839.

$[\alpha]_D^{24}$: -54.9 (c 0.91, CHCl₃).

Benzyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio- α -D-glucopyranoside (134)²¹⁴



According to procedure 1; 53% as a yellow oil ($\alpha/\beta = 2.1/1$); $R_f = 0.25$ (80/20 Toluene/acetone)

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.36-7.14 (m, 5H, Ar-H), 5.65 (d, $J_{NH,2} = 9.2$ Hz, 1H, NH), 5.31 (d, $J_{1,2} = 5.4$ Hz, 1H, H-1), 5.12-4.98 (m, 2H, H-3 and H-4), 4.51-4.39 (m, 1H, H-2), 4.31-4.24 (m, 1H, H-5), 4.19 (dd, $J_{6a,6b} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 4.6$ Hz, 1H, H-6a), 3.90 (dd, $J_{6b,6a} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 3.78 (d, $J = 13.3$ Hz, 1H, CH₂-Ph), 3.73 (d, $J = 13.3$ Hz, 1H, CH₂-Ph), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.97 (s, 3H, OCOCH₃), 1.82 (s, 3H, OCOCH₃).

²¹³ F. H. Cano, C. Foces-Foces, J. Jimenez-Barbero, M. Martin-Lomas, *Carbohydr. Res.* **1984**, *127*, 338-344.

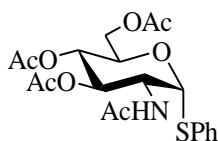
²¹⁴ D. A. Lamprecht, N. O. Muneri, H. Eastwood, K. J. Naidoo, E. Strauss, A. Jardine, *Org. Biomol. Chem.* **2012**, *10*, 5278-5288.

Experimental section

^{13}C NMR (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 171.5 (CO), 170.7 (CO), 169.8 (CO), 169.3 (CO), 137.2, 128.9, 128.7, 127.5 (Ar-C), 83.7 (C-1), 71.4 (C-3 or C-4), 68.7 (C-5), 68.2 (C-3 or C-4), 61.9 (C-6), 52.2 (C-2), 35.1 ($\text{CH}_2\text{-Ph}$), 23.1 (CH_3CO), 20.8 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{21}\text{H}_{27}\text{NNaO}_8\text{S}[M+\text{Na}]^+$: 476.1355; found: 476.1355.

Phenyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio- α -D-glucopyranoside (135)²¹⁵



According to procedure 1; 37% as a yellow oil ($\alpha/\beta=1/6$); $R_f=0.25$ (80/20 Toluene/acetone)

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.48-7.38 (m, 2H, Ar-H), 7.36-7.28 (m, 3H, Ar-H), 5.84 (d, $J_{\text{NH},2}=8.6$ Hz, 1H, NH), 5.69 (d, $J_{1,2}=5.0$ Hz, 1H, H-1), 5.29-5.08 (m, 2H, H-3 and H-4), 4.65-4.55 (m, 1H, H-2), 4.55-4.47 (m, 1H, H-5), 4.28 (dd, $J_{6a,6b}=12.2$ Hz, $J_{6a,5}=4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.09 (dd, $J_{6b,6a}=12.2$ Hz, $J_{6a,5}=2.3$ Hz, 1H, H-6b), 2.06 (s, 9H, 3OCOCH_3), 1.98 (s, 3H, OCOCH_3).

^{13}C NMR (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 171.7 (CO), 170.6 (CO), 169.9 (CO), 169.3 (CO), 132.8, 131.2, 129.3, 127.9 (Ar-C), 87.8 (C-1), 71.4 (C-3 or C-4), 69.0 (C-5), 68.2 (C-3 or C-4), 62.0 (C-6), 52.7 (C-2), 23.3 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO).

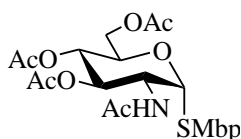
HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{20}\text{H}_{25}\text{NNaO}_8\text{S}[M+\text{Na}]^+$: 462.1193; found: 462.1180.

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm, characteristic signal for β -anomer: 4.86 (d, $J=8.2$ Hz, 1H, H-1).

(2-Methyl-5-*tert*-butyl-phenyl) 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio- α/β -D-glucopyranoside (136)

According to procedure 1.

α -anomer :



²¹⁵ D. W. Gammon, D. J. Steenkamp, V. Mavumengwana, M. J. Marakalala, T. T. Mudzunga, R. Hunter, M. Munyololo, *Biorg. Med. Chem.* **2010**, *18*, 2501-2514.

Experimental section

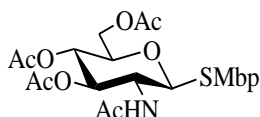
11% as a yellow oil; $R_f = 0.24$ (85/15 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.46 (d, $J = 2.3$ Hz, 1H, Ar-H), 7.23 (dd, $J = 8.1$ Hz, $J = 2.3$ Hz, 1H, Ar-H), 7.14 (d, $J = 8.1$ Hz, 1H, Ar-H), 5.92 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.56 (d, $J_{1,2} = 5.4$ Hz, 1H, H-1), 5.29-5.10 (m, 2H, H-3 and H-4), 4.66-4.54 (m, 1H, H-2), 4.54-4.45 (m, 1H, H-5), 4.29 (dd, $J_{6a,6b} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 4.5$ Hz, 1H, H-6a), 4.08 (dd, $J_{6b,6a} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 2.3$ Hz, 1H, H-6b), 2.38 (s, 3H, CH_3), 2.06 (s, 3H, OCOCH_3), 2.05 (s, 6H, 2OCOCH_3), 1.99 (s, 3H, OCOCH_3), 1.28 (s, 9H, *t*Bu).

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 171.5 (CO), 170.6 (CO), 169.7 (CO), 169.2 (CO), 150.2, 136.6, 131.9, 130.2, 129.6, 125.4 (6C, Ar-C), 88.3 (C-1), 71.4 (C-3 or C-4), 69.4 (C-5), 68.2 (C-3 or C-4), 62.0 (C-6), 52.7 (C-2), 34.4 (C_q , *t*-Bu), 31.3 (*t*-Bu), 23.2 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO), 20.3 (CH_3).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{25}\text{H}_{35}\text{NNaO}_8\text{S}[M+\text{Na}]^+$: 532.1976; found: 532.1959.

β -anomer :



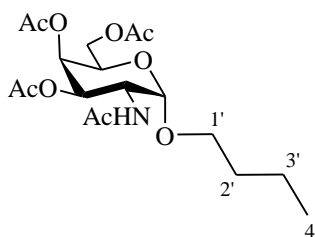
29% as a yellow oil; $R_f = 0.16$ (85/15 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 400 MHz) δ ppm: 7.54 (d, $J = 2.1$ Hz, 1H, Ar-H), 7.23 (dd, $J = 8.0$ Hz, $J = 2.1$ Hz, 1H, Ar-H), 7.12 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H, Ar-H), 5.60 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.2$ Hz, 1H, NH), 5.22 (t, $J_{3,4} = J_{3,2} = 9.7$ Hz, H-3), 5.10 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.7$ Hz, H-4), 4.80 (d, $J_{1,2} = 10.4$ Hz, 1H, H-1), 4.26 (dd, $J_{6a,6b} = 12.4$ Hz, $J_{6a,5} = 4.8$ Hz, 1H, H-6a), 4.16-4.04 (m, 2H, H-6b and H-2), 3.69 (ddd, $J_{5,4} = 9.7$ Hz, $J_{5,6a} = 4.8$ Hz, $J_{5,6b} = 2.2$ Hz), 2.36 (s, 3H, CH_3), 2.06 (s, 3H, OCOCH_3), 2.02 (s, 3H, OCOCH_3), 2.00 (s, 3H, OCOCH_3), 1.98 (s, 3H, OCOCH_3), 1.31 (s, 9H, *t*Bu).

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 100 MHz) δ ppm: 171.4 (CO), 170.7 (CO), 169.9 (CO), 169.2 (CO), 149.7, 137.0, 131.9, 130.0, 129.8, 125.3 (6C, Ar-C), 87.6 (C-1), 75.8 (C-5), 73.8 (C-3), 68.3 (C-4), 62.4 (C-6), 53.5 (C-2), 34.4 (C_q , *t*-Bu), 31.3 (*t*-Bu), 23.3 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO), 20.5 (CH_3CO), 20.3 (CH_3).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{25}\text{H}_{35}\text{NNaO}_8\text{S}[M+\text{Na}]^+$: 532.1976; found: 532.1996.

Butyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-galactopyranoside (141)



According to procedure 1; 75% as a white solid ($\alpha/\beta=15/1$); $R_f = 0.50$ (70/30 Toluene/acetone)

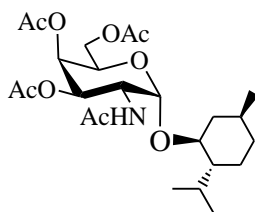
$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: 5.60 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.8$ Hz, 1H, NH), 5.35 (d, $J_{3,4} = 3.4$ Hz, 1H, H-4), 5.14 (dd, $J_{3,2} = 11.4$ Hz, $J_{3,4} = 3.4$ Hz, 1H, H-3), 4.85 (d, $J_{1,2} = 3.8$ Hz, 1H, H-1), 4.55 (ddd, $J_{2,3} = 11.4$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.8$ Hz, $J_{2,1} = 3.8$ Hz, 1H, H-2), 4.18-4.00 (m, 3H, 2H-6 and H-5), 3.67 (dt, $J_{1'a,1'b} = 9.7$ Hz, $J_{1'a,2'a} = 6.4$ Hz, 1H, H-1'a), 3.42 (dt, $J_{1'b,1'a} = 9.7$ Hz, $J_{1'b,2'b} = 6.4$ Hz, 1H, H-1'b), 2.14 (s, 3H, OCOCH_3), 2.03 (s, 3H, OCOCH_3), 1.98 (s, 3H, OCOCH_3), 1.94 (s, 3H, OCOCH_3), 1.63-1.51 (m, 2H, H-2'), 1.43-1.29 (m, 2H, H-3'), 0.930 (t, $J = 7.3$ Hz, 3H, H-4').

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 75 MHz) δ ppm: 171.0 (CO), 170.4 (CO), 170.3 (CO), 170.0 (CO), 97.6 (C-1), 68.6 (C-3), 68.2 (C-1'), 67.5 (C-4), 66.7 (C-5), 62.1 (C-6), 47.8 (C-2), 31.4 (C-2'), 23.3 (CH_3CO), 20.8 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 19.4 (C-3'), 13.8 (C-4').

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NNaO}_9[M+\text{Na}]^+$: 426.1735; found: 426.1724.

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: characteristic signal for β -anomer: 4.68 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, H-1)

(+)-Menthyl 2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- α -D-galactopyranoside (142)



According to procedure 1; 81% as a white solid; $R_f = 0.13$ (90/10 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 5.55 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.5$ Hz, 1H, NH), 5.36 (d, $J_{4,3} = 2.9$ Hz, 1H, H-4), 5.11 (dd, $J_{3,2} = 11.4$ Hz, $J_{3,4} = 2.9$ Hz, 1H, H-3), 5.04 (d, $J_{1,2} = 4.1$ Hz, 1H, H-1), 4.53 (ddd, $J_{2,3} = 11.4$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 4.1$ Hz, 1H, H-2), 4.20 (t, $J_{5,6} = 6.4$ Hz, 1H, H-5), 4.09 (dd, $J_{6a,6b} = 11.4$ Hz, $J_{6a,5} = 6.4$ Hz, 1H, H-6a), 3.99 (dd, $J_{6b,6a} = 11.4$ Hz, $J_{6b,5} = 6.4$ Hz, 1H, H-6b), 3.43 (td, $J = 10.5$ Hz, $J = 4.1$ Hz, 1H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 2.15-2.10 (m, 1H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 2.13 (s, 3H,

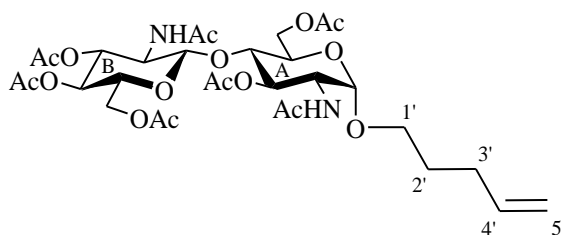
Experimental section

OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.97 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99-1.88 (m, 1H, CH₂), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃), 1.71-1.60 (m, 2H, CH_{2menthyl}), 1.41-1.19 (m, 2H, CH_{menthyl} and CH(CH₃)₂), 0.99-0.90 (m, 1H, CH₂), 0.90 (d, *J* = 6.8 Hz, 3H, CH₃), 0.88 (d, *J* = 6.8 Hz, 3H, CH₃), 0.86-0.79 (m, 1H, CH_{2menthyl}), 0.75 (d, *J* = 6.8 Hz, CH₃), 0.72-0.63 (m, 1H, CH_{2menthyl}).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.0 (CO), 170.3 (CO), 169.9 (CO), 94.2 (C-1), 76.5 (CH_{menthyl}), 68.4 (C-3), 67.5 (C-4), 67.2 (C-5), 62.0 (C-6), 48.0 (CH_{menthyl} or CH(CH₃)₂), 47.8 (C-2), 40.2 (CH_{2menthyl}), 34.3 (CH_{2menthyl}), 31.3 (CH_{menthyl} or CH(CH₃)₂), 25.5 (CH_{menthyl}), 23.2 (CH₃CO), 22.7 (CH_{2menthyl}), 22.2 (CH₃), 22.1 (CH₃), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 15.2 (CH₃).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₂₄H₃₉NO₉+Na⁺: 508.2517 [*M*+Na]⁺; found: 508.2499.

4'-Pentenyl (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-α-D-glucopyranoside (143)



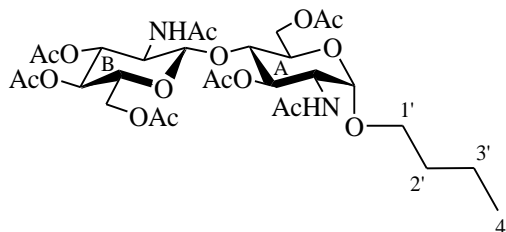
According to procedure 2; 31% as a white solid ($\alpha/\beta = 1/0.8$); *R_f* = 0.30 (50/50 Toluene/acetone)

¹H NMR (CDCl₃, 400 MHz) δ ppm: 6.02 (d, *J*_{NHB,2B} = 9.2 Hz, 1H, NH_B), 5.80 (ddt, *J*_{trans} = 16.7 Hz, *J*_{cis} = 10.1 Hz, *J*_{4',3'} = 6.6 Hz, 1H, H-4'), 5.73 (d, *J*_{NHA,2A} = 9.8 Hz, 1H, NH_A), 5.19 (t, *J* = 9.8 Hz, 2H, H-3_A and H-3_B), 5.09-4.92 (m, 3H, H-4 and 2H-5'), 4.75 (d, *J*_{1,2} = 3.3 Hz, 1H, H-1_A), 4.55 (d, *J*_{1B,2B} = 8.1 Hz, 1H, H-1_B), 4.38 (dd, *J* = 12.3 Hz, *J* = 3.6 Hz, 2H, 2H-6), 4.30-4.17 (m, 2H, H-6 and H-2_A), 4.00 (d, *J* = 12.3 Hz, 1H, H-6), 3.94-3.80 (m, 2H, H-5 and H-2_B), 3.75-3.58 (m, 3H, H-1', H-5 and H-4), 3.46-3.34 (m, 1H, H-1'), 2.14 (s, 3H, OCOCH₃), 2.12-2.09 (m, 2H, H-2'), 2.08 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃), 1.71 (m, 2H, H-3').

¹³C NMR (CDCl₃, 100 MHz) δ ppm: 171.3 (CO), 171.2 (CO), 170.8 (CO), 170.6 (CO), 170.4 (CO), 170.1 (CO), 169.4 (CO), 137.6 (C-4'), 115.3 (C-5'), 101.3 (C-1_B), 97.0 (C-1_A), 76.4 (C-4), 72.4 (C-3), 71.8 (C-5), 71.3 (C-3), 68.7 (C-5), 68.0 (C-4), 67.7 (C-1'), 62.0, 61.6 (2C, 2C-6), 54.8 (C-2_A), 52.0 (C-2_B), 30.2 (C-2'), 28.3 (C-3'), 23.2 (CH₃CO), 21.0 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₃₁H₄₆N₂NaO₁₆[*M*+Na]⁺: 725.2740; found: 725.2734.

Butyl 2-acetamido (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (145)



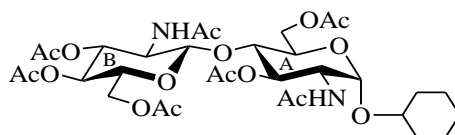
According to procedure 2; 42% as a white solid ($\alpha/\beta = 1.1/1$); $R_f = 0.32$ (50/50 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 400 MHz) δ ppm: 5.93 (d, $J_{\text{NH}_B,2B} = 9.1$ Hz, 1H, NH_B), 5.68 (d, $J_{\text{NH}_A,2A} = 9.8$ Hz, 1H, NH_A), 5.19 (t, $J = 9.8$ Hz, 2H, H-3_A and H-3_B), 5.04 (t, $J = 9.7$ Hz, 1H, H-4), 4.76 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1_A), 4.55 (d, $J_{1B,2B} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_B), 4.37 (dd, $J = 12.4$ Hz, $J = 4.1$ Hz, 2H, H-6_A and H-6_B), 4.26 (dd, $J = 12.3$ Hz, $J = 2.2$ Hz, 1H, H-6), 4.22 (td, $J = 9.8$ Hz, $J = 3.6$ Hz, 1H, H-2_A), 4.00 (dd, $J = 12.3$ Hz, $J = 2.2$ Hz, 1H, H-6), 3.90-3.81 (m, 2H, H-2_B, H-5), 3.72-3.59 (m, 3H, H-1', H-4 and H-5), 3.39 (dt, $J = 9.6$ Hz, $J = 6.6$ Hz, 1H, H-1'), 2.14 (s, 3H, OCOCH_3), 2.07 (s, 3H, OCOCH_3), 2.02 (s, 3H, OCOCH_3), 2.01 (s, 3H, OCOCH_3), 2.00 (s, 3H, OCOCH_3), 1.95 (s, 3H, OCOCH_3), 1.93 (s, 3H, OCOCH_3), 1.62-1.53 (m, 2H, H-2'), 1.40-1.31 (m, 2H, H-3'), 0.939 (t, $J = 7.3$ Hz, 3H, H-4').

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 100 MHz) δ ppm: 171.3 (CO), 171.1 (CO), 170.8 (CO), 170.6 (CO), 170.4 (CO), 170.0 (CO), 169.3 (CO), 101.3 (C-1_B), 97.0 (C-1_A), 76.5 (C-4), 72.5 (C-3), 71.9 (C-5), 71.4 (C-3), 68.7 (C-5), 68.3 (C-1'), 68.1 (C-4), 62.1, 61.7 (2C, 2C-6), 54.9 (C-2_B), 52.1 (C-2_A), 31.3 (C-2'), 23.2 (CH_3CO), 21.0 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO), 19.3 (C-3'), 13.8 (C-4').

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{30}\text{H}_{46}\text{N}_2\text{NaO}_{16}[\text{M}+\text{Na}]^+$: 713.2740; found: 713.2736.

Cyclohexyl 2-acetamido (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (146)



According to procedure 2; 46% as a white solid ; $R_f = 0.40$ (50/50 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: 5.93 (d, $J_{\text{NH}_B,2B} = 9.1$ Hz, 1H, NH_B), 5.66 (d, $J_{\text{NH}_A,2A} = 9.8$ Hz, 1H, NH_A), 5.27-5.12 (m, 2H, H-3_A and H-3_B), 5.04 (t, $J = 9.8$ Hz, 1H, H-4), 4.90 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1_A), 4.58 (d, $J_{1B,2B} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_B), 4.43-4.31 (m, 2H, H-6_A and H-6_B), 4.26

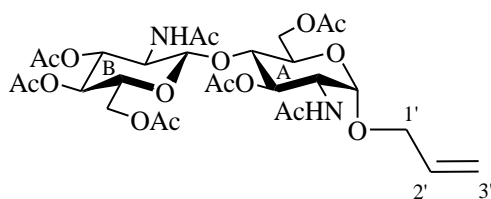
Experimental section

(dd, $J = 12.2$ Hz, $J = 2.2$ Hz, 1H, H-6), 4.23-4.14 (m, 1H, H-2_A), 4.00 (dd, $J = 12.2$ Hz, $J = 2.2$ Hz, 1H, H-6), 3.97-3.92 (m, 1H, H-4), 3.90-3.77 (m, 1H, H-2_B), 3.73-3.59 (m, 2H, H-5_A and H-5_B), 3.57-3.45 (m, 1H, -CH), 2.13 (s, 3H, OCOCH₃), 2.08 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 3H, OCOCH₃), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃), 1.90-1.63 (m, 6H, CH₂cyclohexyl), 1.45-1.27 (m, 4H, CH₂cyclohexyl).

¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.2 (CO), 171.1 (CO), 170.7 (CO), 170.6 (CO), 170.4 (CO), 170.0 (CO), 169.3 (CO), 101.2 (C-1), 95.5 (C-1), 76.9 (CH_{cyclohexyl}), 76.6 (C-4), 72.5 (C-3), 71.9 (C-5), 71.5 (C-3), 68.8 (C-5), 68.1 (C-4), 62.1, 61.7 (2C, 2C-6), 55.0 (C-2), 52.2 (C-2), 33.4, 31.6, 29.7, 25.4, 24.2 (5C, 5CH₂cyclohexyl), 23.2 (CH₃CO), 21.0 (CH₃CO), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₃₂H₄₈N₂NaO₁₆[M+Na]⁺: 739.2996; found: 739.2898.

Allyl 2-acetamido (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (147)



According to procedure 2; 14% as a white solid (as α anomer); $R_f = 0.23$ (50/50 Toluene/acetone)

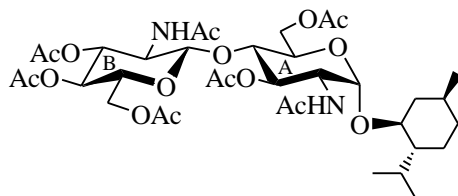
¹H NMR (CDCl₃, 400 MHz) δ ppm: 6.01 (d, $J_{NH_B,2B} = 9.1$ Hz, 1H, NH_B), 5.87 (ddt, $J = 16.1$ Hz, $J = 10.3$ Hz, $J = 6.1$ Hz, 1H, H-2'), 5.77 (d, $J_{NH_A,2A} = 9.6$ Hz, 1H, NH_A), 5.38-5.13 (m, 4H, H-3_A, H-3_B and 2H-3'), 5.04 (t, $J = 9.6$ Hz, 1H, H-4), 4.82 (d, $J_{1,2} = 3.7$ Hz, 1H, H-1_A), 4.55 (d, $J_{1B,2B} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_B), 4.46-4.34 (m, 2H, H-6_A and H_{6B}), 4.31-4.21 (m, 2H, H-6 and H-2_A), 4.19-4.12 (m, 1H, H-1'), 4.05-3.94 (m, 2H, H-6 and H-1'), 3.94-3.80 (m, 2H, H-5 and H-2_B), 3.69 (t, $J = 9.6$ Hz, 1H, H-4), 3.65-3.59 (m, 1H, H-5), 2.15 (s, 3H, OCOCH₃), 2.08 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 100 MHz) δ ppm: 171.3 (CO), 171.1 (CO), 170.8 (CO), 170.6 (CO), 170.5 (CO), 170.2 (CO), 169.4 (CO), 133.0 (C-2'), 118.6 (C-3'), 101.3 (C-1_B), 96.2 (C-1_A), 76.4 (C-4), 72.5 (C-3), 71.9 (C-5), 71.3 (C-3), 68.9 (C-5), 68.7 (C-1'), 68.0 (C-4), 62.0, 61.7 (2C, 2C-6), 54.8 (C-2_B), 52.0 (C-2_A), 23.2 (CH₃CO), 21.0 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₉H₄₂N₂O₁₆+Na⁺: 697.2427 [M+Na]⁺; found: 697.2431.

Experimental section

(+)-Menthyl 2-acetamido (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- β -D glucopyranosyl)- (1 \rightarrow 4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (148)



According to procedure 2; 32% as a white solid ($\alpha/\beta = 12/1$); $R_f = 0.40$ (50/50 Toluene/acetone)

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 300 MHz) δ ppm: 5.93 (d, $J_{\text{NH}_B,2B} = 9.0$ Hz, 1H, NH_B), 5.64 (d, $J_{\text{NH}_A,2A} = 9.4$ Hz, 1H, NH_A), 5.23 (t, $J_{3B,4B} = 9.8$ Hz, 1H, H-3_B), 5.15 (t, $J_{3,2} = 9.8$ Hz, 1H, H-3_A), 5.05 (t, $J_{4B,3B} = 9.8$ Hz, 1H, H-4_B), 4.96 (d, $J_{1,2} = 4.2$ Hz, 1H, H-1_A), 4.62 (d, $J_{1B,2B} = 8.5$ Hz, 1H, H-1_B), 4.43-4.30 (m, 2H, H-6_A and H-6_B), 4.30-4.24 (m, 1H, H-6), 4.25-4.16 (ddd, $J_{2,3} = 9.8$ Hz, $J_{2,\text{NHA}} = 9.8$ Hz, $J_{2,1} = 4.2$ Hz, 1H, H-2_A), 3.99 (dd, $J = 12.5$ Hz, $J = 2.2$ Hz, 1H, H-6), 3.95-3.87 (m, 1H, H-4), 3.87-3.76 (m, 1H, H-2_B), 3.75-3.59 (m, 2H, H-5), 3.41 (td, $J = 10.6$ Hz, $J = 3.8$ Hz, 1H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 2.20-2.10 (m, 1H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 2.13 (s, 3H, OCOCH_3), 2.08 (s, 3H, OCOCH_3), 2.03 (s, 3H, OCOCH_3), 2.00 (s, 3H, OCOCH_3), 1.97-1.82 (m, 1H, $\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 1.93 (s, 6H, 2OCOCH_3), 1.73-1.60 (m, 2H, $\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 1.40-1.21 (m, 2H, $\text{CH}_{\text{menthyl}}$ and $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$), 1.03-0.91 (m, 1H, $\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 0.94 (d, $J = 7.2$ Hz, 3H, CH_3), 0.89 (d, $J = 6.4$ Hz, 3H, CH_3), 0.91-0.83 (m, 1H, $\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 0.79-0.65 (m, 1H, $\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 0.72 (d, $J = 7.2$ Hz, CH_3).

$^{13}\text{C NMR}$ (CDCl_3 , 75 MHz) δ ppm: 171.2 (CO), 171.1 (CO), 170.1 (CO), 170.0 (CO), 169.3 (CO), 101.2 (C-1_B), 93.8 (C-1_A), 77.1 ($\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 76.5 (C-4), 72.4 (C-3_B), 71.9 (C-5), 71.4 (C-3_A), 69.3 (C-5), 68.0 (C-4), 62.2, 61.8 (2C, 2C-6), 55.1 (C-2_B), 52.1 (C-2_A), 47.7 ($\text{CH}_{\text{menthyl}}$ or $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$), 40.3 ($\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 34.2 ($\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 31.3 ($\text{CH}_{\text{menthyl}}$ or $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$), 25.3 ($\text{CH}_{\text{menthyl}}$), 23.2 (CH_3CO), 22.6 ($\text{CH}_2_{\text{menthyl}}$), 22.2 (CH_3), 21.1 (CH_3CO), 21.0 (CH_3), 20.8 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO), 20.6 (CH_3CO), 15.1 (CH_3).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{36}\text{H}_{56}\text{N}_2\text{NaO}_{16}[\text{M}+\text{Na}]^+$: 795.3522; found: 795.3522.

3. Experimental section for Chapter III

- **General procedures**

Procedure 3: Transacylation reaction

To a stirred 0.3M solution of substrate in dry pyridine was added trifluoroacetic anhydride (4.5 equiv per NHAc). The mixture was heated at 135 °C in a sealed tube and stirred for 15-20 minutes. The mixture was then allowed to cool to room temperature. Methanol was added and the resulting solution was stirred for additional 20 minutes. Solvents were removed under reduced pressure and the residue was dissolved in CH₂Cl₂. The organic solution was washed with a 1M aqueous HCl solution. The aqueous layer was extracted twice with CH₂Cl₂. The combined organic layers were washed with brine, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash-column chromatography on silica gel to afford the expected compound.

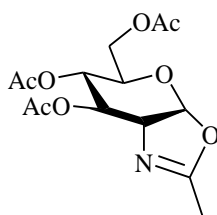
Procedure 4: Zemplén deacetylation

To a solution of the acetylated derivative in methanol (0.03M) was added a catalytic amount of sodium. The resulting mixture was stirred for 24 h at room temperature. Dowex® 50W-X8 (H⁺) resin was then added for neutralization (monitored using pH paper). The resin was filtered off, washed several times with methanol and the filtrate was evaporated to afford the corresponding product.

Procedure 5: NHTFA deprotection

To a solution of the *N*-trifluoroacetylated derivative in methanol (0.06M) was added an aqueous 2M LiOH solution (15 eq per NHTFA). The resulting mixture was stirred for 24 h at room temperature. The solution was deposited on a Dowex® 50W-X8 (H⁺) or Amberlite® column for neutralization (monitored using pH paper). A 7M aqueous NH₃ solution was added to eluate the product. Then, the resin was washed several times with a methanol/water mixture. Solvents were evaporated to afford the deprotected product.

Methyl (3,4,6-tri-O-acetyl-1,2-dideoxy- α -D-glucopyrano)-[2,1-d]-2-oxazoline (90)²¹⁶



²¹⁶ G. Mugunthan, K. P. R. Kartha, *Tetrahedron Lett.* **2012**, 53, 5631-5634.

Experimental section

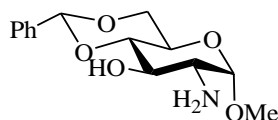
To a solution of **82** (1 g, 2.57 mmol) in dichloroethane (5.2 mL), under argon atmosphere, was added TMSOTf (700 μ L, 3.86 mmol, 1.5 eq). The reaction mixture was stirred in a sealed tube overnight at 50 °C. The TMSOTf was neutralized with an excess of Et₃N (1.61 mL, 11.58 mmol, 3 eq), which was subsequently neutralized with glacial acetic acid (0.662 mL, 11.58 mmol, 3 eq). The mixture was diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The combined organic layers were dried over Na₂SO₄ and concentrated under reduced pressure. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (toluene/acetone: 8/2) to afford **90** (702 mg, 83%) as a colorless liquid.

¹H NMR (CDCl₃, 360MHz) δ ppm 5.92 (d, $J_{1,2} = 7.3$ Hz, 1H, H-1), 5.21 (t_{app}, $J = 2.5$ Hz, 1H, H-5), 4.91-4.84 (m, 1H, H-4), 4.15-4.05 (m, 3H, H-2 and 2H-6), 3.60-3.51 (m, 1H, H-3), 2.07 (s, 3H, CH₃), 2.05-2.04 (m, 6H, 2 CH₃), 2.03 (s, 3H, CH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 170.6 (CO), 169.6 (CO), 169.2 (CO), 166.7 (CO), 99.5 (C-1), 70.6 (C-5), 68.6 (C-4), 67.7 (C-3), 65.2 (C-2), 63.5 (C-6), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 13.9 (CH₃). (in accordance with litt.²¹⁷)

R_f = 0.30 (70/30 Toluene/acetone)

Methyl 2-amino-4,6-O-benzylidene-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (**149**)²¹⁸



To a solution of KOH in absolute ethanol (4M, 13 mL) was added **157 α** (511 mg, 1.58 mmol). The reaction was heated for 4h under reflux. Then, the mixture was concentrated to 7 mL and diluted with CH₂Cl₂ (50 mL). The organic layer was washed twice with water (2 \times 75 mL) and the aqueous phase was extracted twice with CH₂Cl₂ (2 \times 75 mL). The combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated in *vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CombiFlash®) (CHCl₃/MeOH: 95/5) to afford **149** (227 mg, 51%) as a yellow solid.

¹H NMR (CDCl₃, 250 MHz) δ ppm: 7.61-7.44 (m, 2H, Ar-H), 7.42-7.30 (m, 3H, Ar-H), 5.54 (s, 1H, H_{Bz}), 4.70 (d, $J_{1,2} = 3.8$ Hz, 1H, H-1), 4.25 (dd, $J_{6a,6b} = 9.1$ Hz, $J_{6a,5} = 3.9$ Hz, 1H, H-6a), 3.80-3.68 (m, 2H, H-4 and H-6b), 3.57-3.43 (m, 2H, H-3 and H-5), 3.45 (s, 3H, CH₃), 2.82 (dd, $J_{2,3} = 9.4$ Hz, $J_{2,1} = 3.8$ Hz, 1H, H-2).

²¹⁷ D. J. Chambers, G. R. Evans, A. J. Fairbanks, *Tetrahedron* **2004**, *60*, 8411-8419.

²¹⁸ X. Ge, C. Qian, Y. Chen, X. Chen, *Tetrahedron: Asymmetry* **2014**, *25*, 596-601.

Experimental section

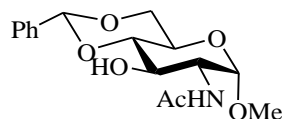
^{13}C NMR (CDCl_3 , 62.5 MHz) δ ppm: 137.3, 129.3, 128.4, 126.4 (Ar-C), 102.0 (C_{Bz}), 101.4 (C-1), 82.1 (C-5), 71.9 (C-3), 69.2 (C-6), 62.7 (C-4), 56.8 (C-2), 55.5 (CH_3). (in accordance with litt.¹⁸⁴)

$R_f = 0.20$ (95/5 $\text{CHCl}_3/\text{MeOH}$)

Methyl 2-acetamido-4,6-O-benzylidene-2-deoxy- α/β -D-glucopyranoside (157 α and 158 β)

N-acetyl-D-glucosamine **155** (1 g, 4.52 mmol) was dissolved in dry methanol (20 mL) and acetyl chloride (1.5 mL, 20 mmol, 6.6 éq) was added slowly. The resulting mixture was stirred for 23h and the solvent was evaporated to give methyl *N*-acetyl-D-glucosamine **156** (1.06 g, 100%) in a quantitative yield as a 1:0.2 α/β anomeric mixture. To a solution of **156** (1.06g, 4.52 mmol) in DMF (12 mL) were added benzaldehyde dimethylacetal (1.4 mL, 9 mmol) and *p*-toluene sulfonic acid (2.4 mg, 0.09 mmol). The mixture was stirred for 2.5 h at 70 °C and the solvent was removed under reduced pressure. Both anomers were separated by flash column chromatography on silica gel (CombiFlash®) ($\text{CHCl}_3/\text{MeOH}$ 9/1) to afford **157 α** (511mg, 35%) and **158 β** (366, 25%) as white solids.

α -anomer (**157 α**):²¹⁹

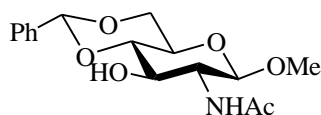


^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.54-7.46 (m, 2H, Ar-H), 7.41-7.33 (m, 3H, Ar-H), 5.87 (d, $J_{\text{NH},2} = 8.4$ Hz, 1H, NH), 5.57 (s, 1H, H_{Bz}), 4.72 (d, $J_{1,2} = 3.9$ Hz, 1H, H-1), 4.29 (dd, $J_{6a,6b} = 8.0$ Hz, $J_{6a,5} = 2.7$ Hz, 1H, H-6a), 4.23 (ddd, $J_{2,3} = 10.0$ Hz, $J_{2,\text{NH}} = 8.4$ Hz, $J_{2,1} = 3.9$ Hz, 1H, H-2), 3.91 (dd, $J_{3,2} = 10.0$ Hz, $J_{3,4} = 9.0$ Hz, 1H, H-3), 3.84-3.73 (m, 2H, H-5 and H-6b), 3.59 (dd, $J_{4,3} = 9.0$ Hz, $J_{4,5} = 8.6$ Hz, 1H, H-4), 3.41 (s, 3H, CH_3), 2.07 (s, 3H OCOCH_3).

^{13}C NMR (CDCl_3 , 90 MHz) δ ppm: 172.8 (CO), 137.1, 129.3, 128.4, 126.4 (Ar-C), 102.1 (C_{Bz}), 98.9 (C-1), 82.2 (C-4), 70.9 (C-3), 68.9 (C-6), 62.4 (C-5), 55.4 (CH_3), 54.2 (C-2), 23.4 (CH_3CO). (in accordance with litt.¹⁸³)

$R_f = 0.45$ (90/10 $\text{CHCl}_3/\text{MeOH}$)

β -anomer (**158 β**):²²⁰



²¹⁹ N. Moitessier, C. Henry, N. Aubert, Y. Chapleur, *Tetrahedron Lett.* **2005**, 46, 6191-6194.

²²⁰ J. M. Vega-Pérez, J. L. Espartero, F. J. Ruiz, F. Alcludia, *Carbohydr. Res.* **1992**, 232, 235-247.

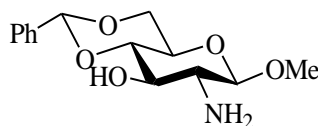
Experimental section

^1H NMR ($\text{CDCl}_3+\text{CD}_3\text{OD}$, 250 MHz) δ ppm: 7.50-7.38 (m, 2H, Ar-H), 7.37-7.27 (m, 3H, Ar-H), 5.50 (s, 1H, H_{Bz}), 4.49 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 4.28 (dd, $J_{6a,6b} = 10.5$ Hz, $J_{6a,5} = 4.8$ Hz, 1H, H-6a), 3.84 (dd, $J_{3,2} = 9.8$ Hz, $J_{3,4} = 8.8$ Hz, 1H, H-3), 3.74 (t_{app}, $J = 10.1$ Hz, H-4), 3.61-3.37 (m, 5H, H-2, H-6b and CH_3), 3.35-3.29 (m, 1H, H-5), 1.97 (s, 3H OCOCH_3).

^{13}C NMR ($\text{CDCl}_3+\text{CD}_3\text{OD}$, 75 MHz) δ ppm: 172.6 (CO), 137.0, 129.1, 128.2, 126.2 (Ar-C), 102.2 (C_{Bz}), 101.7 (C-1), 81.6 (C-4), 71.3 (C-3), 68.6 (C-6), 66.2 (C-5), 57.1 (CH_3), 56.8 (C-2), 22.8 (CH_3CO). (in accordance with litt.¹⁸⁴)

$R_f = 0.20$ (95/5 $\text{CHCl}_3/\text{MeOH}$)

Methyl 2-amino-4,6-*O*-benzylidene-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (**159**)²²¹



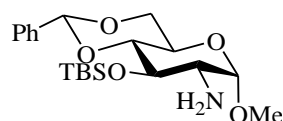
To a 10 mL solution of KOH in absolute ethanol (4M) was added **158 β** (366 mg, 1.13 mmol). The reaction was heated for 4h under reflux. Then, the mixture was concentrated to 5 mL and diluted with CH_2Cl_2 (50 mL). The organic layer was washed twice with water (2×75 mL) and the aqueous phase was extracted twice with CH_2Cl_2 (2×75 mL). The combined organic layers were dried over Na_2SO_4 , filtered and concentrated in *vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CombiFlash®) ($\text{CHCl}_3/\text{MeOH}$: 95/5) to afford **159** (223 mg, 70%) as a yellow solid.

^1H NMR (CDCl_3 , 360 MHz) δ ppm: 7.55-7.45 (m, 2H, Ar-H), 7.42-7.33 (m, 3H, Ar-H), 5.55 (s, 1H, H_{Bz}), 4.35 (dd, $J_{6a,6b} = 10.5$ Hz, $J_{6a,5} = 5.0$ Hz, 1H, H-6a), 4.21 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 3.80 ($J = 10.0$ Hz, 1H, H-6b), 3.63 (t, $J_{3,4} = J_{3,2} = 9.1$ Hz, 1H, H-3), 3.56 (s, 3H, CH_3), 3.55 (t, $J_{4,5} = J_{4,3} = 9.1$ Hz, 1H, H-4), 3.51-3.41 (m, 1H, H-5), 2.80 (dd, $J_{2,3} = 9.1$ Hz, $J_{2,1} = 8.2$ Hz, 1H, H-2).

^{13}C NMR (CDCl_3 , 62.5 MHz) δ ppm: 137.3, 129.3, 128.2, 126.3 (Ar-C), 105.3 (C-1), 101.9 (C_{Bz}), 81.5 (C-4), 72.8 (C-3), 68.8 (C-6), 66.5 (C-5), 57.8 (C-2), 57.4 (CH_3). (in accordance with litt.¹⁸⁴)

²²¹ D. P. G. Emmerson, W. P. Hems, B. G. Davis, *Tetrahedron: Asymmetry* **2005**, *16*, 213-221.

Methyl 2-amino-4,6-O-benzylidene-3-tert-butyldimethylsilyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (161)²²²



To solution of **149** (200 mg, 0.72 mmol) in dichloromethane (6 mL) was successively added DIPEA (2.4 mL, 13.79 mmol, 19 eq), TBSCl (440 mg, 2.88 mmol, 4 eq) and a catalytic amount of DMAP. The reaction mixture was stirred for 96h at room temperature and then diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The organic layers were combined, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (toluene/acetone: 85/15) to afford **161** (313 mg, 49%) as a colorless viscous liquid.

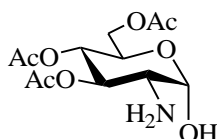
¹H NMR (CDCl₃, 250 MHz) δ ppm: 7.58-7.42 (m, 2H, Ar-H), 7.40-7.29 (m, 3H, Ar-H), 5.48 (s, 1H, H_{Bz}), 4.75 (d, $J_{1,2}$ = 3.5 Hz, 1H, H-1), 4.25 (dd, $J_{6a,6b}$ = 8.6 Hz, $J_{6a,5}$ = 3.5 Hz, 1H, H-6a), 3.92-3.61 (m, 3H, H-3, H-5 and H-6b), 3.40 (s, 3H, CH₃), 3.56-3.29 (m, 1H, H-4), 2.76 (dd, $J_{2,3}$ = 9.2 Hz, $J_{2,1}$ = 3.5 Hz, 1H, H-2), 0.85 (s, 9H, *t*-Bu), 0.065 (s, 3H, SiCH₃), -0.025 (s, 3H, SiCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 62.5 MHz) δ ppm: 137.4, 129.0, 128.1, 126.3 (Ar-C), 102.0 (C_{Bz}), 101.3 (C-1), 82.5 (C-4), 74.3 (C-3), 69.3 (C-6), 63.1 (C-5), 57.9 (C-2), 55.3 (CH₃), 26.0 (*t*-Bu), -3.9 (SiCH₃), -4.6 (SiCH₃).

HRMS (ESI): m/z HRMS (ESI): calcd for C₂₀H₃₃NHO₅Si[M+H]⁺: 396.2201; found: 396.2226.

R_f = 0.66 (90/10 Toluene/acetone)

3,4,6-Tri-O-acetyl-2-amino-2-deoxy- α -D-glucopyranose (162)²²³



To a solution of **169** (100 mg, 0.288 mmol) in anhydrous THF (1.4 mL) was added benzylamine (35 μ L, 0.317 mmol, 1.1 eq). The reaction mixture was stirred for 48 h at room temperature then solvent was evaporated. The residue was purified by flash chromatography on silica gel (CHCl₃/MeOH: 9/1) to afford **162** (40 mg, 46%) as a white solid.

¹H NMR (CDCl₃, 300MHz) δ ppm: 5.33-5.24 (m, 1H, H-1), 5.20 (t, $J_{3,4}$ = $J_{3,2}$ = 9.6 Hz, 1H, H-3), 4.95 (t, $J_{4,5}$ = $J_{4,3}$ = 9.6 Hz, 1H, H-4), 4.37-4.18 (m, 2H, H-6a and H-5), 4.12-4.01 (m, 1H, H-6b), 3.07-2.94 (m, 1H, H-2), 2.07 (s, 6H, 2OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃).

²²² E. J. Grayson, B. G. Davis, *Org. Lett.* **2005**, 7, 2361-2364.

²²³ A. G. Sánchez, A. C. Ventulá, U. Scheidegger, *Carbohydr. Res.* **1971**, 18, 173-183.

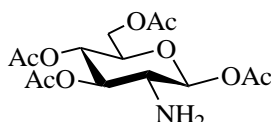
Experimental section

^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ ppm: 171.2 (CO), 170.9 (CO), 169.8 (CO), 92.7 (C-1), 73.9 (C-3), 68.9 (C-4), 67.5 (C-5), 62.4 (C-6), 54.4 (C-2), 21.0 (CH_3CO), 20.8 (CH_3CO), 20.7 (CH_3CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{19}\text{NNaO}_8$ [$M+\text{Na}$] $^+$: 328.1003; found: 328.0994.

R_f = 0.11 (70/30 Toluene/acetone)

1,3,4,6-Tetra-O-acetyl-2-amino-2-deoxy- β -D-glucopyranose (169)²²⁴



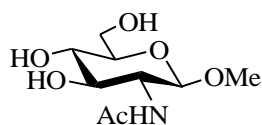
To a solution of D-glucosamine hydrochloride **165** (10 g, 48 mmol) in a freshly prepared aqueous 1M NaOH solution (48 mL) was added 4-methoxybenzaldehyde (7 mL, 59.04 mmol, 1.23 eq.). After a short time, precipitation occurred. The mixture was kept for 2 h at room temperature and the product was filtered off, and successively washed with cold water and a 1:1 mixture of EtOH-Et₂O. The solid was dried over P₂O₅ under reduced pressure to give imine **166** (12.9 g, 90%) as a white solid. To a solution of **166** (10.52g, 35.49 mmol) in pyridine (56 mL) was added dropwise acetic anhydride (31 mL). The reaction mixture was stirred for 1h at 0°C and overnight at room temperature. The yellow solution was poured into 200 mL of ice-water. The precipitated was filtered, washed with cold water and dried over P₂O₅ to give 3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-2-[p-methoxybenzylidene(amino)]-D-glucopyranoside **167** (13.83g, 84%) as a white solid. This compound (9.04 g, 19.42 mmol) dissolved in warm acetone (80 mL) was treated with an aqueous 5M HCl solution (10 mL) affording a precipitate. The mixture was cooled to 0°C before adding Et₂O (80 mL). The solid was filtered, washed with Et₂O and dried to give **168**²²⁵. The ammonium salt **168** (2g, 5.21 mmol) was treated with a saturated aqueous NaHCO₃ solution. The aqueous phase was extracted twice with CH₂Cl₂ and the combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo* to give pure **169**²²⁶ (1.41g, 78%) as a white solid.

²²⁴ P. Boullanger, M. Jouineau, B. Bouammali, D. Lafont, G. Descotes, *Carbohydr. Res.* **1990**, *202*, 151-164.

²²⁵ a) M. Kiso, L. Anderson, *Carbohydr. Res.* **1985**, *136*, 309-323; b) F. Dasgupta, L. Anderson, *Carbohydr. Res.* **1990**, *202*, 239-255.

²²⁶ E. M. S. Pérez, M. Ávalos, R. Babiano, P. Cintas, M. E. Light, J. L. Jiménez, J. C. Palacios, A. Sancho, *Carbohydr. Res.* **2010**, *345*, 23-32.

Methyl 2-acetamido-2-deoxy-β-D-glucopyranoside (171)²²⁷

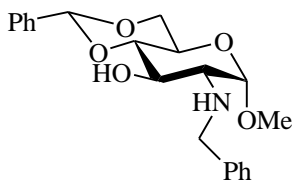


A solution of **170** (1.5 g, 4.11 mmol) in MeOH/CH₂Cl₂ (20.7 mL, 6.67/1 v/v) was treated with a solution of MeOH/MeONa (7.5 mL, 32.77 mmol, 8 eq). The reaction mixture was stirred for 40 min at room temperature. The mixture was neutralized with Dowex® 50W-X8 (H+) resin (monitored by a Litmus paper). The mixture was filtered and the resin was washed with MeOH. The solvent was evaporated and the residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CHCl₃/MeOH: 75/25) to afford **171** (747 mg, 77%) as a white solid.

¹H NMR (CD₃OD, 300 MHz) δ ppm: 4.20 (d, $J_{1,2} = 8.3$ Hz, 1H, H-1), 3.78 (dd, $J_{6a,6b} = 12.1$ Hz, $J_{6a,5} = 2.2$ Hz, 1H, H-6a), 3.58 (dd, $J_{6b,6a} = 12.1$ Hz, $J_{6a,5} = 5.6$ Hz, 1H, H-6b), 3.54 (dd, $J_{3,4} = 10.2$ Hz, $J_{3,2} = 8.6$ Hz, 1H, H-3), 3.36 (s, 3H, CH₃), 3.34-3.27 (m, 1H, H-4), 3.22-3.15 (m, 2H, H-2 and H-5), 1.88 (s, 3H OCOCH₃). (in accordance with litt²²⁸).

R_f = 0.27 (90/10 CHCl₃/MeOH)

Methyl 2-benzylamino-4,6-O-benzylidene-2-deoxy-α-D-glucopyranoside (174)²²⁹



To a solution of **149** (50 mg, 0.18 mmol) in anhydrous MeOH (16 mL) were successively added PhCHO (26 μL, 0.23 mmol, 1.3 eq) and 3 Å molecular sieves. The reaction mixture was stirred for 48 h at room temperature. NaBH₄ (26 mg, 0.69 mmol, 3.83 eq) was then added and the reaction mixture was stirred overnight at room temperature. The solvent was evaporated under reduced pressure and the residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 6/4) to afford **174** (51 mg, 76%) as a white solid.

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.57-7.46 (m, 2H, Ar-H), 7.43-7.24 (m, 8H, Ar-H), 5.55 (s, 1H, H_{Bz}), 4.62 (d, $J_{1,2} = 3.5$ Hz, 1H, H-1), 4.25 (dd, $J_{6a,6b} = 8.6$ Hz, $J_{6a,5} = 3.8$ Hz, 1H, H-6a),

²²⁷ Y. Cai, C.-C. Ling, D. R. Bundle, *Carbohydr. Res.* **2009**, *344*, 2120-2126.

²²⁸ G. E. Whitworth, M. S. Macauley, K. A. Stubbs, R. J. Dennis, E. J. Taylor, G. J. Davies, I. R. Greig, D. J. Vocadlo, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *129*, 635-644.

²²⁹ J. Vega-Pérez, J. Espartero, M. Vega, J. Candela, F. Ingesias-Guerra, F. Alcudia, *Eur. J. Mass Spectrom.* **1995**, *1*, 161-169.

Experimental section

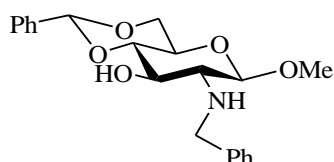
3.89(d, $J = 13.7$ Hz, H_{Bz}), 3.85 (d, $J = 13.7$ Hz, H_{Bz}), 3.84-3.68 (m, 3H, H-3, H-5 and H-6b), 3.53 (t, $J_{4,5} = J_{4,3} = 9.0$ Hz, 1H, H-4), 3.34 (s, 3H, CH_3), 2.70 (dd, $J_{2,3} = 9.5$ Hz, $J_{2,1} = 3.5$ Hz, 1H, H-2).

^{13}C NMR ($CDCl_3$, 90 MHz) δ ppm: 140.2, 137.3, 129.1, 128.4, 128.6, 128.2, 128.1, 127.3, 126.4 (Ar-C), 101.8 (C_{Bz}), 98.5 (C-1), 81.9 (C-4), 69.6 (C-3 or C-5), 69.1 (C-6), 62.5 (C-2), 62.3 (C-3 or C-5), 55.3 (CH_3), 51.9 (C_{Bz}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $C_{21}H_{25}NNaO_5[M+Na]^+$: 394.1625; found: 394.1612.

$R_f = 0.33$ (60/40 Cyclohexane/EtOAc)

Methyl 2-benzylamino-4,6-*O*-benzylidene-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (175)¹⁸⁴



To a solution of **159** (50 mg, 0.18 mmol) in anhydrous MeOH (16 mL) were successively added PhCHO (20 μ L 0.18, 1.0 eq) and 3 Å molecular sieves. The reaction mixture was stirred for 48 h at room temperature. $NaBH_4$ (20 mg, 0.54 mmol, 3.0 eq) was then added and the reaction mixture was stirred overnight at room temperature. The solvent was evaporated under reduced pressure and the resulting residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 6/4) to afford **175** (55 mg, 82%) as a white solid.

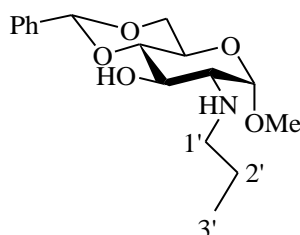
1H NMR ($CDCl_3$, 300 MHz) δ ppm: 7.56-7.20 (m, 10H, Ar-H), 5.52 (s, 1H, H_{Bz}), 4.35 (d, $J_{1,2} = 8.3$ Hz, 1H, H-1), 4.34-4.28 (m, 1H, H-6a), 4.06 (d, $J = 13.1$ Hz, 1H, CH_2Ph), 3.89 (d, $J = 13.1$ Hz, 1H, CH_2Ph), 3.77 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 10.1$ Hz, 1H, H-4), 3.65 (dd, $J_{3,2} = 9.8$ Hz, $J_{3,4} = 10.1$ Hz, 1H, H-3), 3.55 (s, 3H, CH_3), 3.54-3.46 (m, 1H, H-6b), 3.45-3.35 (m, 1H, H-5), 2.65 (dd, $J_{2,3} = 9.8$ Hz, $J_{2,1} = 8.3$ Hz, 1H, H-2).

^{13}C NMR ($CDCl_3$, 90 MHz) δ ppm: 140.1, 137.1, 129.2, 128.4, 128.3, 127.1, 126.3 (Ar-C), 105.6 (C-1), 101.8 (C_{Bz}), 81.4 (C-4), 71.8 (C-3), 68.7 (C-6), 66.3 (C-5), 63.2 (C-2), 57.1 (CH_3), 52.2 (CH_2Ph).

HRMS (ESI): m/z calcd for $C_{21}H_{25}NNaO_5[M+Na]^+$: 394.1625; found: 394.1611.

$R_f = 0.22$ (60/40 Cyclohexane/EtOAc)

Methyl 2-propylamino-4,6-O-benzylidene-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (176)¹⁸⁴



To a solution of **149** (50 mg, 0.18 mmol) in anhydrous MeOH (3 mL) were successively added 3 Å molecular sieves, EtCHO (13 μ L, 0.18mmol, 1.0 eq) and NaBH₃CN (17 mg, 0.27 mmol, 1.5 eq). The reaction mixture was stirred for 24h at room temperature and was quenched with glacial acetic acid (85 μ L). The solvent was evaporated under reduced pressure and the residue was purified by flash column chromatography on silica gel (toluene/acetone: 65/35) to afford **176** (40 mg, 70%) as a white solid.

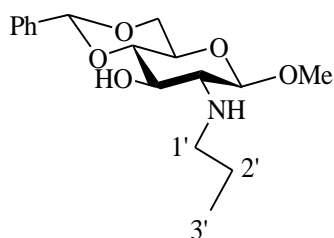
¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.60-7.43 (m, 2H, Ar-H), 7.42-7.28 (m, 3H, Ar-H), 5.55 (s, 1H, H_{Bz}), 4.82 (d, $J_{1,2}$ = 3.5 Hz, 1H, H-1), 4.32 (dd, $J_{6a,6b}$ = 8.2 Hz, $J_{6,5}$ = 3.2 Hz, 1H, H-6a), 3.86-3.66 (m, 3H, H-3, H-5 and H-6b), 3.55 (t, $J_{4,3}$ = $J_{4,5}$ = 9.0 Hz, 1H, H-4), 3.40 (s, 3H, CH₃), 2.77-2.66 (m, 1H, H-1'a), 2.61 (dd, $J_{2,3}$ = 9.8 Hz, $J_{2,1}$ = 3.5 Hz, 1H, H-2), 2.65 (m, 1H, H-1'b), 1.60-1.36 (m, 2H, 2H-2'), 0.91 (t, $J_{3',2'a}$ = $J_{3',2'b}$ = 7.4 Hz, 3H, 3H-3').

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 137.4, 129.1, 128.3, 126.5 (Ar-C), 101.9 (C_{Bz}), 98.4 (C-1), 82.0 (C-4), 69.3 (C-3), 69.1 (C-6), 63.2 (C-2), 62.4 (C-5), 55.4 (CH₃), 49.5 (C-1'), 23.8 (C-2'), 11.7 (C-3').

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₇H₂₅NNaO₅[M+Na]⁺: 346.1625; found: 346.1595.

R_f = 0.22 (80/20 Cyclohexane/EtOAc)

Methyl 2-propylamino-4,6-O-benzylidene-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (177)



To a solution of **159** (50 mg, 0.18 mmol) in anhydrous MeOH (3 mL) were successively added 3 Å molecular sieves, EtCHO (13 μ L, 0.18mmol, 1.0 eq) and NaBH₃CN (17 mg, 0.27 mmol, 1.5 eq). The reaction mixture was stirred for 24h at room temperature and was quenched with glacial

Experimental section

acetic acid (85 μ L). The solvent was evaporated under reduced pressure and the residue was purified by flash column chromatography on silica gel (toluene/acetone: 70/30) to afford **177** (23 mg, 40%) as a white solid.

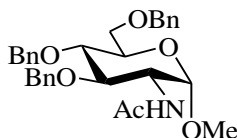
^1H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.53-7.46 (m, 2H, Ar-H), 7.41-7.31 (m, 3H, Ar-H), 5.54 (s, 1H, H_{Bz}), 4.33 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 4.32 (dd, $J_{6a,6b} = 10.0$ Hz, $J_{6,5} = 5.1$ Hz, 1H, H-6a), 3.78 (t, $J_{6b,6a} = 10.0$ Hz, 1H, H-6b), 3.67 (t, $J_{3A,2A} = J_{3A,4A} = 10.0$ Hz, 1H, H-3), 3.56-3.51 (m, 1H, H-4), 3.53 (s, 3H, CH₃), 3.46-3.35 (m, 1H, H-5), 2.83 (dt, $J_{1'a,1'b} = 11.5$ Hz, $J_{1'a,2'a} = 7.2$ Hz 1H, H-1'a), 2.65 (dt, $J_{1'b,1'a} = 11.5$ Hz, $J_{1'b,2'b} = 7.2$ Hz, 1H, H-1'b), 2.56 (dd, $J_{2,3} = 10.0$ Hz, $J_{2,1} = 8.2$ Hz, 1H, H-2), 1.56-1.41 (m, 2H, H-2'), 0.91 (t, $J_{3',2'a} = J_{3',2'b} = 7.2$ Hz, 3H, H-3').

^{13}C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 137.2, 129.3, 128.4, 126.4 (Ar-C), 105.2 (C_{Bz}), 101.9 (C-1), 81.6 (C-4), 71.4 (C-3), 68.8 (C-6), 66.4 (C-5), 64.0 (C-2), 57.2 (CH₃), 49.7 (C-1'), 23.6 (C-2'), 11.7 (C-3').

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₇H₂₅NNaO₅[M+Na]⁺: 346.1625; found: 346.1595.

R_f = 0.10 (70/30 Toluene/acetone)

Methyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-benzyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (**178**)²³⁰



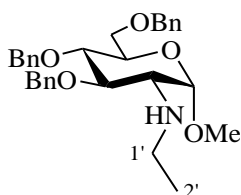
To a solution of **156** (300 mg, 1.275 mmol) in dimethylformamide (3 mL) was added successively Ba(OH)₂·8H₂O (270 mg, 0.858 mmol, 2.0 eq), BaO (1.050 g, 6.84 mmol, 5.4 eq) and BnBr (2.7 mL, 22.73 mmol, 178 eq). The reaction mixture was stirred for 48 h at room temperature and then diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CHCl₃/MeOH: 99/1) to afford **178** (313 mg, 49%) as a white solid.

^1H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.50-7.29 (m, 13H, Ar-H), 7.27-7.22 (m, 2H, Ar-H), 5.43 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.6$ Hz, 1H, NH), 4.90 (d, $J = 11.4$ Hz, 1H, CH₂Ph), 4.87 (d, $J = 10.4$ Hz, 1H, CH₂Ph), 4.74 (d, $J_{1,2} = 3.6$ Hz, 1H, H-1), 4.73 (d, $J = 10.4$ Hz, 1H, CH₂Ph), 4.70 (d, $J = 11.4$ Hz, 1H, CH₂Ph), 4.59 (d, $J = 11.3$ Hz, 1H, CH₂Ph), 4.32 (dt, $J_{2,3} = J_{2,\text{NH}} = 9.6$ Hz, $J_{2,1} = 3.6$ Hz, 1H, H-2), 3.87-3.68 (m, 5H, H-3, H-4, H-5 and 2H-6), 3.39 (s, 3H, CH₃), 1.90 (s, 3H OCOCH₃). (in accordance with litt.¹⁸³).

R_f = 0.27 (99/1 CHCl₃/MeOH)

²³⁰ C. Henry, J.-P. Joly, Y. Chapleur, *J. Carbohydr. Chem.* **1999**, *18*, 689-695.

Methyl 2-ethylamino-3,4,6-tri-O-benzyl-2-deoxy- α -D-glucopyranoside (179)



To a solution of **178** (69 mg, 0.136 mmol) in THF (730 μ l) under argon atmosphere was carefully added LiAlH₄ (26 mg, 0.69 mmol, 5 eq). After evacuation of hydrogen gas, the reaction mixture was stirred in a sealed tube for 2 days at 70 °C. Water was added to neutralize excess of LiAlH₄. Then the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 6/4) to afford **179** (37 mg, 55%) as a colorless liquid.

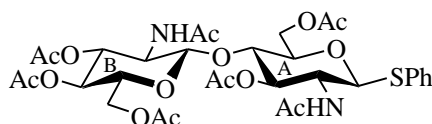
¹H NMR (CDCl₃, 250 MHz) δ ppm: 7.44-7.23 (m, 13H, Ar-H), 7.22-7.12 (m, 2H, Ar-H), 4.93 (d, J = 11.4 Hz, 1H, CH₂Ph), 4.88-4.76 (m, 3H, CH₂Ph and H-1), 4.69 (d, J = 12.0 Hz, 1H, CH₂Ph), 4.58-4.47 (m, 2H, CH₂Ph), 3.86-3.60 (m, 5H, H-3, H-4, H-5 and 2 H-6), 3.41 (s, 3H, CH₃), 2.90-2.55 (m, 3H, H-2 and 2H_{1'}), 1.10 (t, $J_{3',2'} = 7.2$ Hz, 3H, H_{2'}).

¹³C NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 139.1, 138.7, 129.1, 128.9, 128.8, 128.3, 128.2, 128.1 (Ar-C), 99.0 (C-1), 80.8, 79.3, 71.2 (3C, C-3, C-4 and C-5), 76.1, 75.3, 74.0 (3C, 3CH₂), 69.1 (C-6), 62.6 (C-2), 55.5 (CH₃), 42.8 (C-1'), 15.9 (C-2').

HRMS (ESI): m/z calcd for C₃₀H₃₇NHO₅[M+H]⁺: 492.2745; found: 492.2735.

R_f = 0.59 (100% EtOAc)

Phenyl (2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-3,6-di-O-acetyl-2-deoxy-1-thio- β -D-glucopyranoside (182)²³¹



To a suspension of **78** (3.00g, 4.43 mmol) in DCE (46 mL) were added successively powdered ZnI₂ (9.9 g, 31 mmol) and PhSTMS (3.39 mL, 17.77 mmol). The mixture was stirred overnight at 50°C. Then the solvent was evaporated. Cold methanol was added to the residue until a white

²³¹ S. Takahashi, H. Terayama, H. Koshino, H. Kuzuhara, *Tetrahedron* **1999**, 55, 14871-14884.

Experimental section

precipitate appeared, which was filtered. The solid was washed with cold diethyl ether and dried to give **182** as a white solid (2.70 g, 84%).

¹H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 7.43-7.35 (m, 2H, Ar-H), 7.24-7.14 (m, 3H, Ar-H), 5.06 (t, $J_{3B,4B} = J_{3B,2B} = 10.1$ Hz, 1H, H-3_B), 4.99-4.85 (m, 2H, H-3 and H-4_A or H-4_B), 4.62 (d, $J_{1A,2A} = 10.6$ Hz, 1H, H-1_A), 4.44 (d, $J_{1B,2B} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_B), 4.35-4.23 (m, 2H, 2H-6), 4.04-3.86 (m, 3H, 2H-6 and H-2_A), 3.76 (dd, $J_{2B,3B} = 10.1$ Hz, $J_{2B,1B} = 8.3$ Hz, 1H, H-2_B), 3.68-3.50 (m, 3H, H-5_A, H-5_B and H-4_A or H-4_B), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 1.97 (s, 3H, OCOCH₃), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃), 1.92 (s, 3H, OCOCH₃), 1.91 (s, 3H, OCOCH₃), 1.90 (s, 3H, OCOCH₃), 1.86 (s, 3H, OCOCH₃), 1.80 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.6 (CO), 171.3 (CO), 170.7 (CO), 170.6 (CO), 170.2 (CO), 169.5 (CO), 132.2, 131.7, 128.2, 127.3 (Ar-C), 100.2 (C-1_B), 85.4 (C-1_A), 76.0, 75.8, 74.0, 71.0, 68.0 (5C, C-3_A, C-4_A, C-4_B, C-5_A and C-5_B), 71.9 (C-3_B), 62.3, 61.3 (2C, 2C-6), 54.2 (C-2_B), 52.4 (C-2_A), 21.7 (CH₃CO), 19.8 (CH₃CO), 19.7 (CH₃CO), 19.6 (CH₃CO), 19.5 (CH₃CO).

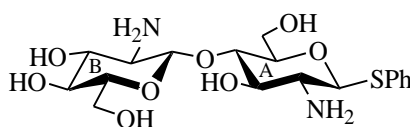
HRMS (ESI): m/z calcd for C₃₂H₄₂N₂NaO₁₅S[M+Na]⁺: 749.2198; found: 749.2182.

Mp: 297-298 °C

[α]_D²⁴: -34.2 (*c* 0.653, MeOH+CHCl₃ 1/1).

R_f = 0.20 (60/40 Toluene/acetone)

Phenyl (2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranoside (183)



Obtained from **186** (811 mg, 1.48 mmol) as a white solid (437 mg, 68%) according to procedure 5.

¹H NMR (CD₃OD, 360 MHz) δ ppm: 7.60-7.54 (m, 2H, Ar-H), 7.37-7.22 (m, 3H, Ar-H), 4.60 (d, $J_{1A,2A} = 9.9$ Hz, 1H, H-1_A), 4.41 (d, $J_{1B,2B} = 8.5$ Hz, 1H, H-1_B), 3.96-3.81 (m, 3H, 3H-6), 3.66 (t, $J = 5.9$ Hz, 1H, H-6_B), 3.60 (t, $J_{4A,3A} = J_{4A,5A} = 9.1$ Hz, H-4_A), 3.50-3.41 (m, 2H, H-3_A and H-5_A), 3.34-3.19 (m, 3H, H-3_B, H-4_B and H-5_B), 2.68 (t, 1H, $J_{2A,1A} = J_{2A,3A} = 9.9$ Hz, H-2_A), 2.62 (t, 1H, $J_{2B,1B} = J_{2B,3B} = 8.5$ Hz, H-2_B).

Experimental section

^{13}C NMR (CD₃OD, 90 MHz) δ ppm: 134.4, 133.3, 130.1, 128.9 (Ar-C), 104.7 (C-1_B), 89.7 (C-1_A), 80.7 (C-5_A), 80.5 (C-4_A), 78.4 (C-5_B), 77.7 (C-3_B), 77.4 (C-3_A), 71.7 (C-4_B), 62.6, 62.3 (2C, 2C-6), 58.5 (C-2_B), 57.1 (C-2_A).

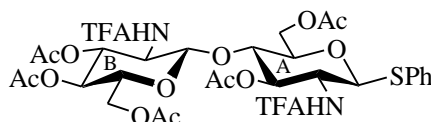
HRMS (ESI): calcd for C₁₈H₂₈N₂NaO₈S[M+Na]⁺: 455.1459; found: 455.1456.

Mp: 261-262 °C

$[\alpha]_{\text{D}}^{24}$: -43.2 (*c* 0.767, MeOH).

R_f = 0.19 (90/10 CH₃CN/H₂O+1% NH₃)

Phenyl (3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranoside (184)



Obtained from **182** (1.00 g, 1.377 mmol) as a yellow solid (1.136 g, 99%) according to procedure 3.

^1H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 8.92-8.52 (m, 2H, NH_A and NH_B), 7.61-7.44 (m, 2H, Ar-H), 7.44-7.23 (m, 3H, Ar-H), 5.42-5.21 (m, 2H, H-3_A and H-3_B), 5.16 (d, $J_{1A,2A}$ = 10.6 Hz, 1H, H-1_A), 5.11-4.97 (m, 2H, H-1_B and H-4_B or H-4_A), 4.50 (dd, $J_{6,6}$ = 12.0 Hz, $J_{6,5}$ = 1.5 Hz, 1H, H-6), 4.43 (dd, $J_{6,6}$ = 12.4 Hz, $J_{6,5}$ = 4.5 Hz, 1H, H-6), 4.18 (dd, $J_{6,6}$ = 12.0 Hz, $J_{6,5}$ = 5.6 Hz, 1H, H-6), 4.11-3.86 (m, 5H, H-2_A, H-2_B, H-6, H-5_A or H-5_B, and H-4_A or H-4_B), 3.85-3.73 (m, 1H, H-5_A or H-5_B), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.04 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 1.98 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃).

^{13}C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 170.7 (CO), 170.5 (CO), 169.9 (CO), 133.2, 133.1, 129.8, 128.8 (Ar-C), 100.6 (C-1_B), 85.5 (C-1_A), 77.7 (C-5_A or C-5_B), 76.0, 74.2, 72.7, 72.5 (4C, C-5_A or C-5_B, C-4_A or C-4_B, C-3_A, C-3_B), 69.1 (C-4_A or C-4_B), 62.0, 62.4 (2C, 2C-6), 55.8 (C-2_B), 54.3 (C-2_A), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO), 20.3 (CH₃CO).

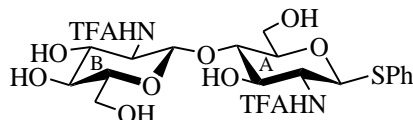
HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₃₂H₃₆N₂F₆NaO₁₅S [M+Na]⁺: 857.1633; found: 857.1641.

Mp: 266-267 °C

$[\alpha]_{\text{D}}^{24}$: -44.5 (*c* 0.569, MeOH+CHCl₃ 4/96).

R_f = 0.74 (60/40 Toluene/acetone)

Phenyl (2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (186)



Obtained from **184** (876 mg, mol) as a white solid (581 mg, 89%) according to procedure 4.

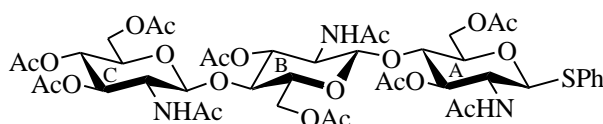
¹H NMR (CD₃OD, 360 MHz) δ ppm: 7.45-7.38 (m, 2H, Ar-H), 7.26-7.15 (m, 3H, Ar-H), 4.74 (d, $J_{1A,2A} = 10.4$ Hz, 1H, H-1_A), 4.54 (d, $J_{1B,2B} = 8.7$ Hz, 1H, H-1_B), 3.84 (dd, $J_{6,6} = 12.3$ Hz, $J_{6,5} = 1.8$ Hz, 1H, H-6), 3.81-3.66 (m, 3H, 2H-2 and H-6), 3.65-3.19 (m, 8H, 2H-3, 2H-4, 2H-5, 2-H6).

¹³C NMR (CD₃OD, 90 MHz) δ ppm: 134.9, 132.9, 130.2, 128.8 (Ar-C), 102.1 (C-1_B), 87.7 (C-1_A), 80.7, 80.3, 78.4, 75.2, 72.1 (C-3_B, C-3_A, C-4_A, C-4_B, C-5_A and C-5_B), 62.6, 61.7 (2C, 2C-6), 57.9 (C-2_B), 56.1 (C-2_A).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₂H₂₆F₆N₂NaO₁₀S[M+Na]⁺: 647.1105; found: 647.1105.

R_f = 0.62 (90/10 CH₃CN/H₂O+5% NH₃)

Phenyl (2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(2-acetamido-3,6-di-O-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-3,6-di-O-acetyl-2-deoxy-1-thio-β-D-glucopyranoside (187)



To a suspension of **79** (3.00 g, 3.11 mmol) in DCE (50 mL) were successively added powdered ZnI₂ (6.96 g, 21.77 mmol, 7eq) and PhSTMS (2.37 mL, 12.44 mmol, 4 eq). The mixture was stirred for 24 h at 70°C, and the solvent was evaporated. Cold methanol was added to the residue until a white precipitate appeared. The solid was filtered and washed with cold diethyl ether to give **187** as a white solid (2.32 g, 73%).

¹H NMR (DMSO-d₆, 360 MHz) δ ppm: :8.13-7.93 (m, 2H, 2NH), 7.91 (d, $J_{NH,2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.12 (t, $J_{3,4} = J_{3,2} = 9.8$ Hz, 1H, H-3), 5.06-4.86 (m, 3H, H-1_A and 2H-3), 4.80 (t, $J_{4,5} = J_{4,3} = 9.3$ Hz, 1H, H-4), 4.64 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 4.56 (d, $J_{1,2} = 7.7$ Hz, 1H, H-1), 4.44-4.16 (m, 3H, 3H-6), 4.16-3.95 (m, 2H, 2H-6), 3.95-3.47 (m, 9H, H-2_A, H-2_B, H-2_C, 2H-4, H-5_A, H-5_B, H-5_C and H-6), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.90 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.77 (s, 3H, OCOCH₃), 1.74 (s, 6H, 2OCOCH₃).

Experimental section

¹³C NMR (DMSO-d₆, 90 MHz) δ ppm: 170.1 (CO), 170.0 (CO), 169.9 (CO), 169.6 (CO), 169.4 (CO), 169.3 (3C, 3CO), 169.2 (CO), 169.1 (CO), 133.6, 129.9, 128.9, 126.9 (Ar-C), 101.1 (C-1), 99.9 (C-1), 84.4 (C-1_A), 75.8, 75.6, 75.5, 74.1, 73.3, 72.3, 71.6, 70.4 (8C, 2C-4, C-3_A, C-3_B, C-3_C, C-5_A, C-5_B, C-5_C), 68.2 (C-4), 62.5 (C-6), 61.6 (C-6), 53.9 (C-2), 53.7 (C-2), 52.3 (C-2_A), 22.7 (CH₃CO), 22.6 (CH₃CO), 22.5 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 20.4 (CH₃CO), 20.3 (CH₃CO).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₄₄H₅₉N₃NaO₂₂S[M+Na]⁺: 1036.3203 found: 1036.3179.

Phenyl (3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (188)



Obtained from **187** (400 mg, 0.394 mmol) as a yellow solid (286 mg, 62%) according to procedure 3.

¹H NMR ((CD₃)₂CO, 400 MHz) δ ppm: 8.63 (d, *J*_{NH,2} = 9.6 Hz, 1H, NH), 8.60 (d, *J*_{NH,2} = 9.6 Hz, 1H, NH), 8.51 (d, *J*_{NH,2} = 9.6 Hz, 1H, NH), 7.52-7.44 (m, 2H, Ar-H), 7.37-7.28 (m, 3H, Ar-H), 5.28 (dd, *J* = 9.4 Hz, *J* = 10.5 Hz, 1H, H-3), 5.26-5.18 (m, 2H, 2H-3), 5.13 (d, *J*_{1A,2A} = 10.6 Hz, 1H, H-1_A), 5.04 (t, *J* = 9.7 Hz, 1H, H-4), 4.97 (d, *J*_{1,2} = 8.3 Hz, 1H, H-1), 4.96 (d, *J*_{1,2} = 8.3 Hz, 1H, H-1), 4.49 (dd, *J*_{6,6} = 12.2 Hz, *J*_{6,5} = 1.9 Hz, 1H, H-6), 4.44-4.34 (m, 2H, 2H-6), 4.21 (dd, *J*_{6,6} = 12.7 Hz, *J*_{6,5} = 5.4 Hz, 1H, H-6), 4.18 (dd, *J*_{6,6} = 12.5 Hz, *J*_{6,5} = 5.9 Hz, 1H, H-6), 4.08-4.00 (m, 2H), 4.00-3.82 (m, 5H), 3.79-3.69 (m, 2H, 2H-5 or H-4 and H-5 or 2H-5), 2.05 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.95 (s, 3H, OCOCH₃), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃), 1.91 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR ((CD₃)₂CO, 100 MHz) δ ppm: 170.8 (CO), 170.7 (CO), 170.6 (CO), 170.5 (CO), 170.4 (CO), 169.8 (CO), 133.2, 133.0, 129.8, 128.7 (6Ar-C), 100.5 (C-1), 100.4 (C-1), 85.5 (C-1_A), 77.7 (C-4 or C-5), 75.9 (2 C-4 or 2 C-5 or C-4 and C-5), 74.1 (C-3), 73.6 (C-5 or C-4), 73.0 (C-3), 72.7 (C-3), 72.6 (C-4 or C-5), 69.1 (C-4), 63.1, 63.0, 62.4 (3C, 3C-6), 55.8 (C-2), 55.7 (C-2), 54.3 (C-2_A), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO), 20.3 (CH₃CO).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₄₄H₅₀F₉N₃NaO₂₂S[M+Na]⁺: 1198.2355 found: 1198.2372.

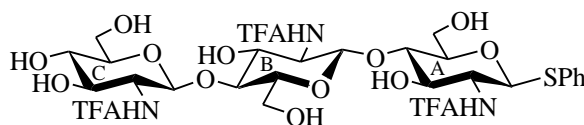
Mp: 235-236 °C

[α]_D²⁴: -26.4 (c 0.840, MeOH+CHCl₃ 1/1).

R_f = 0.22 (99/1 CHCl₃/MeOH)

Experimental section

Phenyl (2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (189)



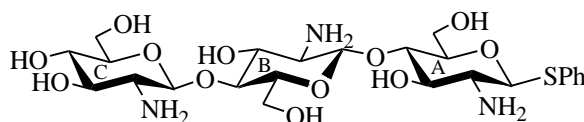
Obtained from **188** (660 mg, 0.561 mmol) as a white solid (494 mg, 100%) according to procedure 4.

¹H NMR (DMSO-*d*₆, 360 MHz) δ ppm: 9.49 (d, $J_{\text{NH}_A,2A} = 8.9$ Hz, 1H, NH_A), 9.41 (d, $J_{\text{NH},2} = 8.2$ Hz, 1H, NH), 9.29 (d, $J_{\text{NH},2} = 9.0$ Hz, 1H, NH), 7.45-7.38 (m, 2H, Ar-H), 7.37-7.23 (m, 3H, Ar-H), 5.27 (br s, 1H, OH), 5.21 (br s, 1H, OH), 4.89 (d, $J_{1A,2A} = 10.5$ Hz, 1H, H-1_A), 4.84 (d, $J = 3.0$ Hz, 1H, OH), 4.80 (br s, 1H, OH), 4.76 (br s, 2H, 2 OH), 4.56 (d, $J_{1,2} = 7.8$ Hz, 1H, H-1), 4.50 (d, $J_{1,2} = 8.1$ Hz, 1H, H-1), 4.02-2.93 (m, 18H, H-2_A, H-2_B, H-2_C, H-3_A, H-3_B, H-3_C, H-4_A, H-4_B, H-4_C, H-5_A, H-5_B, H-5_C, and 6H-6).

¹³C NMR (DMSO-*d*₆, 90 MHz) δ ppm: 133.9, 129.7, 129.0, 126.9 (Ar-C), 100.6 (C-1), 100.1 (C-1), 85.0 (C-1_A), 80.5, 79.4, 79.0, 77.0, 74.7, 73.1, 72.0, 71.7, 70.5 (9C, C-3_A, C-3_B, C-3_C, C-4_A, C-4_B, C-4_C, C-5_A, C-5_B, C-5_C), 60.8, 59.8, 59.7 (3C, C-6_A, C-6_B, C-6_C), 56.2, 55.6, 54.5 (3C, C-2_A, C-2_B, C-2_C).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₃₀H₃₆F₉N₃NaO₁₅S[M+Na]⁺: 904.1616 found: 904.1615.

Phenyl (2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-amino-2-deoxy-1-thio-β-D-glucopyranoside (190)



Obtained from **189** (480 mg, 0.544 mmol) as a white solid (173 mg, 54%) according to procedure 5.

¹H NMR (360 MHz, CD₃OD) δ ppm: 7.56-7.45 (m, 2H, Ar-H), 7.34-7.15 (m, 3H, Ar-H), 4.51 (d, $J_{1A,2A} = 9.9$ Hz, 1H, H-1_A), 4.39 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 4.34 (d, $J_{1,2} = 8.2$ Hz, 1H, H-1), 3.87-3.69 (m, 5H, 5H-6), 3.63-3.52 (m, 3H), 3.47-3.36 (m, 4H), 3.33-3.18 (m, 3H), 2.69-2.53 (m, 3H, 3H-2).

¹³C NMR (90 MHz, DMSO-*d*₆) δ ppm: 134.2, 133.4, 130.2, 129.0 (Ar-C), 104.3 (C-1), 103.9 (C-1), 89.6 (C-1_A), 80.7, 80.4, 80.2, 78.5, 77.3, 77.2, 76.9, 75.6, 71.8 (9C, C-3_A, C-3_B, C-3_C, C-

Experimental section

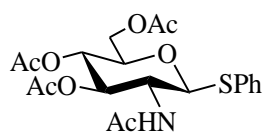
4_A, C-4_B, C-4_C, C-5_A, C-5_B, C-5_C), 62.6, 62.2, 61.9 (3C, C-6_A, C-6_B, C-6_C), 58.4, 58.3 (2C, C-2_B, C-2_C), 57.1 (C-2_A).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₄H₃₉N₃HO₁₂S[M+H]⁺: 594.2327 found: 594.2317.

Mp: 128-129 °C

[α]_D²⁴: -34.6 (*c* 0.706, MeOH+CHCl₃ 12/88).

Phenyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio- β -D-glucopyranoside (191)²³²

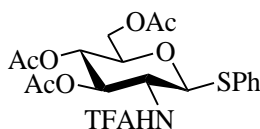


K₂CO₃ (0.99 g, 7.13 mmol, 1.3 eq) and compound **170** (2.00 g, 5.48 mmol) were successively added to a solution of thiophenol (0.72 g, 6.6 mmol, 1.2 eq) in dry acetone (14 mL) and toluene (4 mL). The mixture was stirred for 2h at 50 °C, then solvents were evaporated. The residue was dissolved in water and ethyl acetate. The aqueous phase was extracted twice with EtOAc and the combined organic layers were dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The resulting solid was recrystallized in ethyl acetate, washed with cold diethyl ether to give **191** (1.36 g, 57% after two recrystallizations) as a white solid.

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 7.54-7.44 (m, 2H, Ar-H), 7.37-7.27 (m, 3H, Ar-H), 5.57 (d, $J_{NH,2} = 9.1$ Hz, 1H, NH), 5.22 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.8$ Hz, 1H, H-3), 5.05 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.8$ Hz, 1H, H-4), 4.84 (d, $J_{1,2} = 10.5$ Hz, 1H, H-1), 4.26-4.11 (m, 2H, H-6), 4.09-3.93 (m, 1H, H-2), 3.77-3.65 (m, 1H, H-5), 2.07 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 1.98 (s, 3H, OCOCH₃). (in accordance with litt.¹⁶⁵).

R_f = 0.14 (80/20 Toluene/acetone)

Phenyl 3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranoside (192)²³³



²³² D. J. Silva, H. Wang, N. M. Allanson, R. K. Jain, M. J. Sofia, *J. Org. Chem.* **1999**, *64*, 5926-5929.

²³³ A. D'Almeida, M. Ionata, V. Tran, C. Tellier, M. Dion, C. Rabiller, *Tetrahedron: Asymmetry* **2009**, *20*, 1243-1246.

Experimental section

Obtained from **191** (800 mg, 1.82 mmol) as a yellow solid (790 mg, 88%) according to procedure 3.

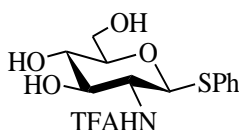
¹H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 7.53-7.36 (m, 2H, Ar-H), 7.32-7.19 (m, 3H, Ar-H), 5.25 (t, $J_{3,2} = J_{3,4} = 9.7$ Hz, 1H, H-3), 4.95 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.7$ Hz, 1H, H-4), 4.71 (d, $J_{1,2} = 10.6$ Hz, 1H, H-1), 4.28-4.09 (m, 2H, H-6), 4.08-3.92 (m, 1H, H-2), 3.83-3.60 (m, 1H, H-5), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃), 1.83 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.6 (CO), 169.7 (CO), 169.4 (CO), 133.5, 131.2, 129.1, 128.8 (Ar-C), 86.1 (C-1), 75.8 (C-5), 73.4 (C-3), 68.4 (C-4), 62.4 (C-6), 53.2 (C-2), 20.7 (CH₃CO), 20.4 (CH₃CO).

HRMS (ESI): calcd for C₂₀H₂₂F₃NNaO₈S [$M+Na$]⁺: 516.0910; found: 516.0945.

[α]_D²⁴: -25.8 (c 0.493, CHCl₃).

Phenyl 2-deoxy-1-thio-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (193)²³⁴



Obtained from **192** (650 mg, 1.318 mmol) as a white solid (405 mg, 84%) according to procedure 4.

¹H NMR (CD₃OD, 400 MHz) δ ppm: 7.48-7.43 (m, 2H, Ar-H), 7.28-7.17 (m, 3H, Ar-H), 4.81-4.74 (m, 1H, H-1), 3.84 (dd, $J_{6a,6b} = 12.1$ Hz, $J_{6a,5} = 2.1$ Hz, 1H, H-6a), 3.74 (t, $J_{2,3} = J_{2,1} = 9.7$ Hz, 1H, H-2), 3.64 (dd, $J_{6b,6a} = 12.1$ Hz, $J_{6b,5} = 5.5$ Hz, 1H, H-6b), 3.49 (t, $J_{3,4} = J_{3,2} = 9.7$ Hz, 1H, H-3), 3.34-3.27 (m, 2H, H-4 and H-5).

¹³C NMR (CD₃OD, 100 MHz) δ ppm: 135.1, 133.0, 130.1, 128.8 (Ar-C), 87.8 (C-1), 82.4 (C-4 or C-5), 76.9 (C-3), 71.9 (C-4 or C-5), 62.9 (C-6), 56.7 (C-2).

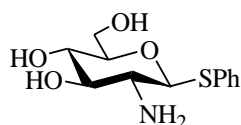
HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₄H₁₆F₃NNaO₅S [$M+Na$]⁺: 390.0593; found: 390.0585.

Mp: 243-244 °C

[α]_D²⁴: +30.0 (c 0.420, MeOH).

²³⁴ G. Despras, D. Urban, B. Vauzeilles, J.-M. Beau, *Chem. Commun.* **2014**, 50, 1067-1069.

Phenyl 2-amino-2-deoxy-1-thio-β-D-glucopyranoside (194)²³⁵



Obtained from **193** (387 mg, mol) as a white solid (107 mg, 38%) according to procedure 5.

¹H NMR (CD₃OD, 300 MHz) δ ppm: 7.60-7.43 (m, 2H, Ar-H), 7.25-7.10 (m, 3H, Ar-H), 4.42 (d, *J*_{1,2} = 9.8 Hz, 1H, H-1), 3.76 (dd, *J*_{6a,6b} = 12.1 Hz, *J*_{6a,5} = 1.9 Hz, 1H, H-6a), 3.56 (dd, *J*_{6b,6a} = 12.1 Hz, *J*_{6b,5} = 5.3 Hz, 1H, H-6b), 3.22-3.12 (m, 3H, H-3, H-4 and H-5), 2.55-2.42 (m, 1H, H-2).

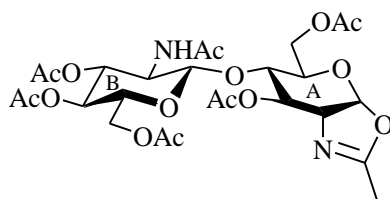
¹³C NMR (CD₃OD, 75 MHz) δ ppm: 134.6, 133.2, 130.1, 128.8 (Ar-C), 90.0 (C-1), 82.4, 79.3, 71.6 (3C, C-3, C-4 and C-5), 63.0 (C-6), 57.3 (C-2).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₁₂H₁₇NNaO₄S [*M*+Na]⁺: 294.0770; found: 294.0764.

Mp: 211-212 °C

[α]_D²⁴: -50.0 (*c* 0.900, MeOH).

Methyl (2-acetamido-3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-(3,6-di-O-acetyl-1,2-dideoxy-α-D-glucopyrano)-[2,1-d]-2-oxazoline (195)²³⁶



To a solution of **78** (2.00 g, 2.96 mmol) in dichloroethane (5.2 mL) under argon atmosphere was added TMSOTf (1.2 mL, 6.64 mmol, 1.5 eq). The reaction mixture was stirred for 4 h in a sealed tube at 50°C. The TMSOTf was neutralized with an excess of Et₃N (2.8 mL, 19.76 mmol, 3 eq). Et₃N was neutralized with glacial acetic acid (1.2 mL, 19.76 mmol, 3 eq) and the mixture was diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The organic layers were combined, dried over Na₂SO₄,

²³⁵ N. Z. Abdelwahab, M. D. Urbaniak, M. A. J. Ferguson, A. T. Crossman, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 708-714.

²³⁶ J. Lünig, U. Möller, D. Müller, P. Welzel, A. Markus, Y. van Heijenoort, J. van Heijenoort, *Tetrahedron* **1993**, *49*, 10587-10596.

Experimental section

filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (toluene/acetone 6/4) to afford **195** (1.81 g, 96%) as a white solid.

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 5.93-5.79 (m, 2H, H-1 and NH_B), 5.64 (br s, 1H, H-3), 5.20 (t, $J_{3B,4B} = J_{3B,2B} = 9.8$ Hz, 1H, H-3_B), 5.05 (t, $J_{4B,3B} = J_{4B,5B} = 9.8$ Hz, 1H, H-4_B), 4.74 (d, $J_{1B,2B} = 8.6$ Hz, 1H, H-1_B), 4.34-4.20 (m, 2H, 2H-6), 4.17-4.04 (m, 3H, 2H-6 and H-2), 3.90 (dt, $J_{2B,3B} = 9.8$ Hz, $J_{2B,NHB} = J_{2B,1B} = 8.6$ Hz, 1H, H-2, 1H, H-2_B), 3.76 (ddd, $J_{5B,4B} = 9.8$ Hz, $J_{5B,6B} = 4.1$ Hz, $J_{5B,6B} = 2.8$ Hz, 1H, H-5_B), 3.60-3.52 (m, 1H, H-4_A), 3.50-3.42 (m, 1H, H-5_A), 2.12 (s, 3H, OCOCH₃), 2.07 (s, 6H, 2OCOCH₃), 2.06 (s, 3H, CH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.92 (s, 3H, OCOCH₃).

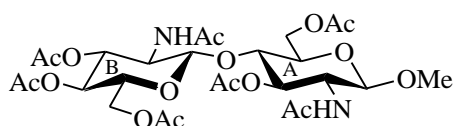
¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 171.2 (CO), 170.8 (CO), 170.4 (CO), 169.4 (CO), 169.3 (CO), 166.8 (CO), 102.5 (C-1_B), 99.2 (C-1_A), 77.4 (C-4_A), 72.9 (C-3_B), 72.1 (C-5_B), 70.6 (C-3_A), 68.6 (C-4_B), 67.9 (C-5_A), 65.1 (C-2_A), 63.2, 62.2 (2C, 2 C-6), 54.7 (C-2_B), 23.2 (CH₃CO), 21.0 (CH₃CO), 20.9 (CH₃CO), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 14.0 (CH₃).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₆H₃₆N₂NaO₁₅ [$M+H$]⁺: 617.2188; found: 617.2195.

Mp: 173-174 °C

R_f = 0.32 (60/40 Toluene/acetone)

Methyl (2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-β-D-glucopyranoside (196)²³⁷



To a solution of **195** (369 mg, 0.598 mmol) in anhydrous MeOH (13 mL, 526 eq.) was added TMSOTf (24 μL, 0.120 mmol, 0.2 eq.). The reaction mixture was stirred for 1h 10 at room temperature. During the reaction, **196** precipitated out of solution as a white solid. The mixture was quenched with Et₃N (20 μL) and the solvent was evaporated under reduced pressure. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CHCl₃/MeOH: 97/3) to afford **196** (227 mg, 58%) as a white solid.

¹H NMR (CDCl₃+CD₃OD, 360 MHz) δ ppm: 7.11 (d, $J_{NHB,2B} = 9.5$ Hz, 1H, NH_B), 6.88 (d, $J_{NHA,2} = 9.5$ Hz, 1H, NH_A), 5.10 (t, $J_{3B,4B} = J_{3B,2B} = 9.5$ Hz, 1H, H-3_B), 5.03-4.91 (m, 2H, H-3_A and H-4_B), 4.48 (d, $J_{1B,2B} = 8.5$ Hz, 1H, H-1_B), 4.38-4.27 (m, 2H, 2H-6), 4.30 (d, $J_{1A,2A} = 8.4$ Hz, 1H, H-1_A), 4.10 (dd, $J_{6,6} = 11.8$ Hz, $J_{6,5} = 5.7$ Hz, 1H, H-6), 3.97 (dd, $J_{6,6} = 12.3$ Hz, $J_{6,5} = 1.9$ Hz, 1H, H-6), 3.90 (dt, $J_{2A,3A} = J_{2A,NHA} = 9.5$ Hz, $J_{2A,1A} = 8.4$ Hz, 1H, H-2_A), 3.81 (dt, $J_{2B,3B} = J_{2B,NHB} =$

²³⁷ B. Yu, Q. Ouyang, C. Li, Y. Hui, *J. Carbohydr. Chem.* **1996**, *15*, 297-302.

Experimental section

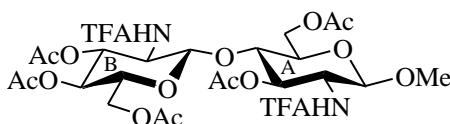
9.5 Hz, $J_{2B,1B} = 8.5$ Hz, 1H, H-2_B), 3.65 (t, $J_{4A,3A} = J_{4A,5A} = 9.5$ Hz, 1H, H-4_A), 3.62-3.52 (m, 2H, H-5_A and H-5_B), 3.40 (s, 3H, CH₃), 2.07 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃), 1.98 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 6H, 2OCOCH₃), 1.88 (s, 3H, OCOCH₃), 1.85 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CDCl₃+CD₃OD, 90 MHz) δ ppm: 171.5 (CO), 171.2 (CO), 171.1 (CO), 170.9 (CO), 170.8 (CO), 169.6 (CO), 101.7 (C-1_A), 101.1 (C-1_B), 76.1 (C-5_B), 72.9 (C-3_A), 72.7 (C-5_A), 72.5 (C-3_B), 71.6 (C-4_A), 68.2 (C-4_B), 62.7, 61.8 (2C, 2C-6), 56.6 (CH₃), 54.3 (C-2_B), 53.3 (C-2_A), 22.8 (CH₃CO), 22.7 (CH₃CO), 20.8 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₇H₄₀N₂NaO₁₆[M+Na]⁺: 671.2270; found: 671.2260.

R_f = 0.17 (50/50 Toluene/acetone)

Methyl (3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-3,6-di-*O*-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranoside (197)



Obtained from **195** (1.81 g, 2.94 mmol) as a yellow solid (2.33 g, 95%) according to procedure 3.

¹H NMR (Acetone-d₆, 400 MHz) δ ppm: 8.67 (d, $J_{NHB,2B} = 9.3$ Hz, 1H, NH_B), 8.53 (d, $J_{NHA,2A} = 9.3$ Hz, 1H, NH_A), 5.33 (t, $J_{3B,4B} = J_{3B,2B} = 9.8$ Hz, 1H, H-3_B), 5.22 (dd, $J = 10.5$ Hz, $J = 9.0$ Hz, 1H, H-3_A), 5.07 (t, $J_{4B,5B} = J_{4B,3B} = 9.8$ Hz, 1H, H-4_B), 5.04 (d, $J_{1B,2B} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_B), 4.73 (d, $J_{1A,2A} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_A), 4.49 (dd, $J_{6A,6A} = 12.2$ Hz, $J_{6A,5A} = 1.7$ Hz, 1H, H-6_A), 4.44 (dd, $J_{6B,6B} = 12.7$ Hz, $J_{6B,5B} = 4.2$ Hz, 1H, H-6_B), 4.18 (dd, $J_{6A,6A} = 12.2$ Hz, $J_{6A,5A} = 5.3$ Hz, 1H, H-6_A), 4.06 (dd, $J_{6B,6B} = 12.7$ Hz, $J_{6B,5B} = 2.3$ Hz, 1H, H-6_B), 4.04-3.88 (m, 4H, H-2_A, H-2_B, H-5_B and H-4_A), 3.71 (ddd, $J_{5A,4A} = 9.7$ Hz, $J_{5A,6A} = 5.3$ Hz, $J_{5A,6A} = 1.7$ Hz, 1H, H-5_A), 3.45 (s, 3H, CH₃), 2.07 (s, 3H, OCOCH₃), 2.05 (s, 3H, OCOCH₃), 2.04 (s, 3H, OCOCH₃), 1.98 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (Acetone-d₆, 100 MHz) δ ppm: 170.7 (CO), 170.6 (CO), 170.5 (CO), 169.9 (CO), 100.6 (C-1_A), 100.6 (C-1_B), 76.3 (C-5_B or C-4_A), 73.6 (C-5_A), 73.3 (C-3_A), 72.7 (C-3_B), 72.5 (C-5_B or C-4_A), 69.1 (C-4_B), 62.8 (C-6_A), 62.4 (C-6_B), 56.9 (CH₃), 55.8 (C-2_B), 55.4 (C-2_A), 20.6 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO), 20.3 (CH₃CO).

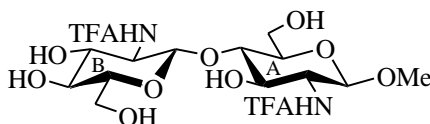
HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₇H₃₄F₆N₂NaO₁₆ [M+Na]⁺: 779.1705; found: 779.1726.

Mp: 242-243 °C

$[\alpha]_D^{24}$: -56.0 (c 0.713, MeOH+CHCl₃ 4/96).

R_f = 0.24 (50/50 Cyclohexane/EtOAc)

Methyl (2-deoxy-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-deoxy-2-trifluoroacetamido- β -D-glucopyranoside (198)²³⁸



Obtained from **197** (2.33 g, 3.08 mmol) as a white solid (1.67 g, 99%) according to procedure 4.

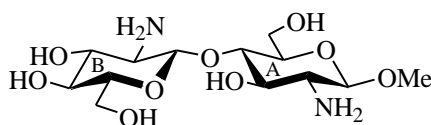
¹H NMR (CD₃OD, 300 MHz) δ ppm: 4.49 (d, $J_{1A,2A} = 8.3$ Hz, 1H, H-1_A), 4.26 (d, $J_{1B,2B} = 7.9$ Hz, 1H, H-1_B), 3.79 (dd, $J_{6,6} = 11.7$ Hz, $J_{6,5} = 1.9$ Hz, 1H, H-6), 3.74-3.12 (m, 14H, 2H-2, 2H-3, 2H-4, 2H-5 and 3H-6 and CH₃).

¹³C NMR (CD₃OD, 75 MHz) δ ppm: 103.0 (C-1_A), 102.2 (C-1_B), 80.7, 78.4, 76.5, 75.2, 73.8, 72.1 (6C, C-3_B, C-3_A, C-4_A, C-4_B, C-5_A and C-5_B), 62.6, 61.5 (2C, 2C-6), 57.9 (C-2_B), 57.3, 57.1 (2C, C-2_A and CH₃).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₇H₂₄F₆N₂NaO₁₁ [$M+Na$]⁺: 569.1176; found: 569.1154.

R_f = 0.68 (90/10 CH₃CN/H₂O + 5% NH₃)

Methyl (2-amino-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (199)



Obtained from **198** (1.665 g, 3.05 mmol) as a white solid (805 mg, 75%) according to procedure 5.

¹H NMR (CD₃OD, 300 MHz) δ ppm: 4.34 (d, $J_{1B,2B} = 7.9$ Hz, 1H, H-1_B), 4.13 (d, $J_{1A,2A} = 7.9$ Hz, 1H, H-1_A), 3.96-3.71 (m, 3H, 3H-6), 3.63 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H, H-6), 3.56 (t, $J_{4A,3A} = J_{4A,5A} = 9.3$ Hz, 1H, H-4_A), 3.48 (s, 3H, OMe), 3.44-3.34 (m, 2H, H-3_A and H-5_A), 3.29-3.18 (m, 3H, H-3_B, H-4_B and H-5_B), 2.66 (t, $J = 8.9$ Hz, 2H, H-2_A and H-2_B).

²³⁸ P. Gatellier, J. P. Grivet, F. Delmotte, *Biochim. Biophys. Acta, Protein Struct. Mol. Enzymol.* **1987**, 916, 428-436.

Experimental section

^{13}C NMR (CD₃OD, 75 MHz) δ ppm: 105.4 (C-1_A), 104.8 (C-1_B), 81.0 (C-4_A), 78.4 (C-5_B), 77.7 (C-3_B), 76.8 (C-5_A), 75.9 (C-3_A), 71.7 (C-4_B), 62.6, 62.1 (2C, 2C-6), 58.6, 58.2 (2C, 2C-2), 57.5 (CH₃).

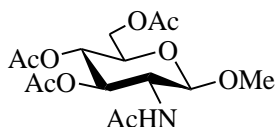
HRMS (ESI): calcd for C₁₃H₂₆N₂NaO₉ [$M+\text{Na}$]⁺: 377.1531; found: 377.1519.

Mp: 170-171 °C

$[\alpha]_{\text{D}}^{24}$: -23.6 (*c* 1.09, MeOH).

R_f = 0.24 (60/40 MeOH/CHCl₃)

Methyl 2-acetamido-3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (200)²³⁹



To an ice-cold solution of **90** (590 mg, 1.79 mmol) in anhydrous MeOH (38 mL, 526 eq.) was added TMSOTf (112 μL , 0.619 mmol, 0.35 eq). The reaction mixture was stirred for 1 h30 at room temperature and the mixture was quenched with Et₃N (104 μL). The solvent was evaporated under reduced pressure. The residue was purified by flash chromatography on silica gel (CHCl₃/MeOH 99/1) to afford **200** (317 mg, 49%) as a white solid.

^1H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 5.83 (d, $J_{\text{NH},2}$ = 8.5 Hz, 1H, NH), 5.26 (t, $J_{3,2}$ = $J_{3,4}$ = 9.9 Hz, 1H, H-3), 5.05 (t, $J_{4,3}$ = $J_{4,5}$ = 9.9 Hz, 1H, H-4), 4.57 (d, $J_{1,2}$ = 8.5 Hz, 1H, H-1), 4.26 (dd, $J_{6a,6b}$ = 12.4 Hz, $J_{6a,5}$ = 4.9 Hz, 1H, H-6a), 4.12 (dd, $J_{6b,6a}$ = 12.4 Hz, $J_{6b,5}$ = 2.7 Hz, 1H, H-6b), 3.86 (dt, $J_{2,3}$ = 9.9 Hz, $J_{2,\text{NH}}$ = $J_{2,1}$ = 8.5 Hz, 1H, H-2), 3.70 (ddd, $J_{5,4}$ = 9.9 Hz, $J_{5,6a}$ = 4.9 Hz, $J_{5,6b}$ = 2.7 Hz, 1H, H-5), 2.06 (s, 3H, OCOCH₃), 2.01 (s, 3H, OCOCH₃), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.93 (s, 3H, OCOCH₃).

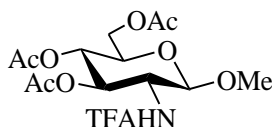
^{13}C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 170.9 (CO), 170.8 (CO), 170.4 (CO), 169.4 (CO), 101.6 (C-1), 72.5 (C-3), 71.8 (C-5), 68.7 (C-4), 62.2 (C-6), 56.8 (CH₃), 54.6 (C-2), 23.4 (CH₃CO), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO).

HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₁₅H₂₄NNaO₉ [$M+\text{Na}$]⁺: 384.1265; found: 384.1282.

R_f = 0.25 (99/10 CHCl₃/MeOH)

²³⁹ K. Glegoła, E. Framery, C. Goux-Henry, K. Michał Pietrusiewicz, D. Sinou, *Tetrahedron* **2007**, *63*, 7133-7141.

Methyl 3,4,6-tri-O-acetyl-2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (201)²⁴⁰



Obtained from **200** (200 mg, 0.533 mmol) as a yellow solid (232 mg, 100%) according to procedure 3.

¹H NMR (CDCl₃, 300 MHz) δ ppm: 6.88 (d, $J_{NH,2} = 8.6$ Hz, 1H, NH), 5.30 (dd, $J_{3,2} = 10.4$ Hz, $J_{3,4} = 9.4$ Hz, 1H, H-3), 5.01 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.4$ Hz, 1H, H-4), 4.57 (d, $J_{1,2} = 8.6$ Hz, 1H, H-1), 4.29 (dd, $J_{6a,6b} = 12.4$ Hz, $J_{6a,5} = 4.9$ Hz, 1H, H-6a), 4.16 (dd, $J_{6b,6a} = 12.4$ Hz, $J_{6b,5} = 2.4$ Hz, 1H, H-6b), 4.00 (dt, $J_{2,3} = 10.4$ Hz, $J_{2,NH} = J_{2,1} = 8.6$ Hz, 1H, H-2), 3.75 (ddd, $J_{5,4} = 9.4$ Hz, $J_{5,6a} = 4.9$ Hz, $J_{5,6b} = 2.4$ Hz, 1H, H-5), 3.05 (s, 3H, CH₃), 2.09 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 2.02 (s, 3H, OCOCH₃).

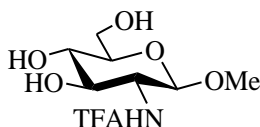
¹³C NMR (CDCl₃, 75 MHz) δ ppm: 171.2 (CO), 170.9 (CO), 169.4 (CO), 101.1 (C-1), 72.0 (C-5), 71.8 (C-3), 68.5 (C-4), 62.0 (C-6), 57.1 (CH₃), 54.8 (C-2), 20.8 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.5 (CH₃CO).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₁₄H₁₇F₃NO₈ [$MH^+ - MeOH$]⁺: 384.0901; found: 384.0887.

[α]_D²⁴: -54.5 (*c* 0.347, CHCl₃).

R_f = 0.56 (70/30 Toluene/acetone)

Methyl 2-deoxy-2-trifluoroacetamido-β-D-glucopyranoside (202)²⁴¹



Obtained from **201** (208mg, 0.500 mmol) as white solid (77 mg, 53%) according to procedure 4.

²⁴⁰ H. Lin, C. T. Walsh, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 13998-14003.

²⁴¹ F. P. Boulineau, A. Wei, *Carbohydr. Res.* **2001**, *334*, 271-279.

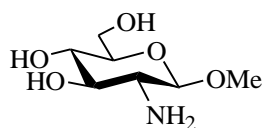
Experimental section

¹H NMR (CD₃OD, 300 MHz) δ ppm: 4.41 (d, $J_{1,2} = 8.3$ Hz, 1H, H-1), 3.91 (dd, $J_{6a,6b} = 12.0$ Hz, $J_{6a,5} = 2.2$ Hz, 1H, H-6a), 3.78-3.65 (m, 2H, H-6b and H-2), 3.60-3.50 (m, 1H, H-3 or H-4 or H-5), 3.49 (s, 3H, CH₃), 3.39-3.28 (m, 2H).

¹³C NMR (CD₃OD, 75 MHz) δ ppm: 103.1 (C-1), 78.2, 75.4, 72.3 (3C, C-4, C5 and C-3), 62.8 (C-6), 57.8 (CH₃), 57.3 (C-2).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₉H₁₄F₃NNaO₆ [$M+Na$]⁺: 312.0665; found: 312.0658.

Methyl 2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranoside (203)²⁴²



Obtained from **202** (62 mg, 0.214 mmol) as a white solid (30 mg, 72 %) according to procedure 5.

¹H NMR (D₂O, 300 MHz) δ ppm: 4.45 (d, $J_{1,2} = 8.5$ Hz, 1H, H-1), 3.91 (dd, $J_{6a,6b} = 12.3$ Hz, $J_{6a,5} = 2.0$ Hz, 1H, H-6a), 3.72 (dd, $J_{6b,6a} = 12.3$ Hz, $J_{6b,5} = 5.6$ Hz, 1H, H-6b), 3.56 (s, 3H, CH₃), 3.55 (dd, $J_{3,2} = 10.0$ Hz, $J_{3,4} = 9.0$ Hz, 1H, H-3), 3.52-3.43 (m, 1H, H-5), 3.38 (t, $J_{4,3} = J_{4,5} = 9.0$ Hz, 1H, H-4), 2.78 (dd, $J_{2,3} = 10.0$ Hz, $J_{2,1} = 8.5$ Hz, 1H, H-2);

¹³C NMR (D₂O, 75 MHz) δ ppm: 102.0 (C-1), 71.0 (C-5), 73.8 (C-3), 69.8 (C-4), 60.6 (C-6), 57.4 (CH₃), 56.1 (C-2).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₇H₁₅NNaO₅ [$M+Na$]⁺: 216.0848; found: 216.0840.

Mp: 197-198 °C

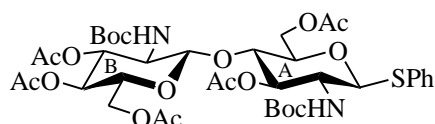
[α]_D²⁴: -23.4 (*c* 0.933, MeOH).

R_f = 0.31 (70/30 MeOH/CHCl₃)

Phenyl (3,4,6-tri-O-acetyl-2-N-tert-butyloxycarbonyl-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-3,6-di-O-acetyl-2-N-tert-butyloxycarbonyl-2-deoxy-1-thio-β-D-glucopyranoside (205)

²⁴² X. Hu, W. Zhang, I. Carmichael, A. S. Serianni, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 4641-4652.

Experimental section



In a sealed tube were successively added **182** (400 mg, 0.55 mmol), Boc₂O (1.68 g, 7.71 mmol, 14 eq) and pyridine (4 mL). The reaction mixture was stirred for 5h15 at 70 °C and the solvent was evaporated. The residue was purified by flash chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 7/3) to afford **204** (381 mg, 75%) as a white solid. To a solution of **204** (381 mg, 0.411 mmol) in dimethylformamide (2.9 mL) was added hydrazine acetate (83 mg, 0.904 mmol, 2.2 eq). The reaction mixture was stirred for 4h at room temperature and then diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The combined organic layers were, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (CHCl₃/acetone: from 95/5 to 90/10) to afford **205** (283 mg, 82%) as a white solid.

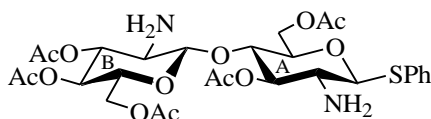
¹H NMR (DMSO-d₆, 360 MHz) δ ppm: 7.40-7.23 (m, 5H, Ar-H), 7.04 (d, $J_{NH_B,2B} = 9.5$ Hz, 1H, NH_B), 6.97 (d, $J_{NH_A,2A} = 9.5$ Hz, 1H, NH_A), 5.08 (t, $J_{3B,2B} = J_{3B,4B} = 10.0$ Hz, 1H, H-3_B), 4.98 (t, $J_{3A,2A} = J_{3A,4A} = 9.4$ Hz, 1H, H-3_A), 4.91 (d, $J_{1A,2A} = 10.5$ Hz, 1H, H-1_A), 4.80 (t, $J_{4B,3B} = J_{4B,5B} = 10.0$ Hz, 1H, H-4_B), 4.59 (d, $J_{1B,2B} = 8.7$ Hz, 1H, H-1_B), 4.36-4.28 (m, 1H, H-6), 4.26 (dd, $J_{6,6} = 12.4$ Hz, $J_{6,5} = 3.8$ Hz, 1H, H-6), 4.17 (dd, $J_{6,6} = 12.3$ Hz, $J_{6,5} = 6.7$ Hz, 1H, H-6), 3.92-3.85 (m, 1H, H-6), 3.78-3.66 (m, 2H, H-4_A and H-5_B), 3.64-3.55 (m, 1H, H-5_A), 3.49-3.41 (m, 1H, H-2_A), 3.27-3.19 (m, 1H, H-2_B), 2.00 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.95 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃), 1.90 (s, 3H, OCOCH₃), 1.37 (s, 9H, Boc), 1.33 (s, 9H, Boc).

¹³C NMR (DMSO-d₆, 90 MHz) δ ppm: 170.0 (CO), 169.7 (CO), 169.4 (CO), 169.2 (CO), 155.0 (CO, Boc), 154.9 (CO, Boc), 133.3, 130.2, 129.4, 127.0 (Ar-C), 100.6 (C-1_B), 84.6 (C-1_A), 78.2 (C_q, Boc), 78.1 (C_q, Boc), 76.0 (C-4_A), 75.8 (C-5_A), 74.7 (C-3_A), 72.7 (C-3_B), 71.0 (C-5_B), 68.1 (C-4_B), 62.4, 61.6 (2C, 2C-6), 55.3 (C-2_B), 53.8 (C-2_A), 28.1 (*t*Bu), 27.9 (*t*Bu), 20.6 (CH₃CO), 20.4 (CH₃CO), 20.3 (CH₃CO).

HRMS (ESI): calcd for C₃₈H₅₄N₂NaO₁₇S[M+Na]⁺: 865.3035; found: 865.3040.

R_f = 0.45 (90/10 CH₂Cl₂/acetone)

Phenyl (3,4,6-tri-*O*-acetyl-2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-3,6-di-*O*-acetyl-2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranoside (206)



To solution of **205** (210 mg, 0.249 mmol) in distilled CHCl₃ (4.2 mL) was added CF₃COOH (2.2 mL, 28.6 mmol, 115 eq). The reaction mixture was stirred for 1 h at room temperature. The acidic

Experimental section

mixture was neutralized with a saturated aqueous solution of NaHCO₃ and then diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH₂Cl₂. The combined organic layers were, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (100% CH₃CN to 90/10 CH₃CN/MeOH) to afford **206** (123 mg, 77%) as a white solid.

¹H NMR (CHCl₃, 300 MHz) δ ppm: 7.56-7.41 (m, 2H, Ar-H), 7.34-7.18 (m, 3H, Ar-H), 5.00-4.80 (m, 3H, 2H-3 and H-4), 4.63 (d, *J*_{6,6} = 12.1 Hz, 1H, H-6), 4.41 (d, *J*_{1A,2A} = 9.8 Hz, 1H, H-1_A), 4.31 (dd, *J*_{6,6} = 12.1 Hz, *J*_{6,5} = 4.5 Hz, 1H, H-6), 4.19 (dd, *J*_{6,6} = 12.1 Hz, *J*_{6,5} = 5.3 Hz, 1H, H-6), 4.15 (d, *J*_{1B,2B} = 7.9 Hz, 1H, H-1_B), 3.95 (dd, *J*_{6,6} = 12.1 Hz, *J*_{6,5} = 1.9 Hz, 1H, H-6), 3.70-3.51 (m, 3H, 2H-5 and H-4), 2.90-2.65 (m, 2H, 2H-2), 2.04 (s, 3H, OCOCH₃), 2.03 (s, 3H, OCOCH₃), 1.99 (s, 3H, OCOCH₃), 1.98 (s, 3H, OCOCH₃), 1.94 (s, 3H, OCOCH₃).

¹³C NMR (CHCl₃, 75 MHz) δ ppm: 170.7 (CO), 170.6 (CO), 170.4 (CO), 169.7 (CO), 132.9, 131.8, 128.9, 128.1 (Ar-C), 103.6 (C-1_B), 89.3 (C-1_A), 77.2 (C-4), 75.9 (C-3_A), 75.6 (C-5), 75.0 (C-3_B), 71.8 (C-5), 68.5 (C-4), 62.7, 62.0 (2C, 2C-6), 56.0 (C-2_B), 54.9 (C-2_A), 20.9 (CH₃CO), 20.7 (CH₃CO), 20.6 (CH₃CO).

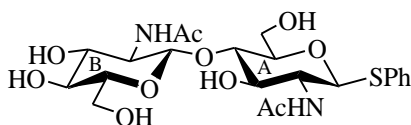
HRMS (ESI): *m/z* calcd for C₂₈H₃₈N₂HO₁₃S[M+H]⁺: 643.2167; found: 643.2172.

Mp: 77-78 °C

[α]_D²⁴: -13.7 (*c* 0.633, CHCl₃).

R_f = 0.23 (100% CH₃CN)

Phenyl (2-acetamido-2-deoxy-β-D-glucopyranosyl)-(1→4)-2-acetamido-2-deoxy-1-thio-β-D-glucopyranoside (207)



Obtained from **182** (1.00, 1.38 mmol) as a white solid (708 mg, 99%) according to procedure 4 (reaction time was 3 h).

¹H NMR (DMSO-*d*₆, 360 MHz) δ ppm: 7.92 (d, *J*_{NHA,2A} = 9.1 Hz, 1H, NH_A), 7.73 (d, *J*_{NHB,2B} = 9.5 Hz, 1H, NH_B), 7.45-7.36 (m, 2H, Ar-H), 7.35-7.25 (m, 2H, Ar-H), 7.24-7.16 (m, 1H, Ar-H), 5.07 (d, *J* = 5.4 Hz, OH), 4.97 (d, *J* = 5.5 Hz, OH), 4.86-4.75 (m, 2H, H-1_A and OH), 4.72-4.61 (m, 2H, 2 OH), 4.35 (d, *J*_{1B,2B} = 8.7 Hz, 1H, H-1_B), 3.80-3.59 (m, 3H, H-2_A and 2H-6), 3.58-2.97 (m, 9H, H-2_B, 2H-3, 2H-4, 2H-5 and 2H-6), 1.82 (s, 6H, 2OCOCH₃).

Experimental section

^{13}C NMR (DMSO- d_6 , 90 MHz) δ ppm: 169.1 (CO), 168.9 (CO), 135.4, 128.9, 128.7, 126.2 (Ar-C), 102.0 (C-1_B), 85.9 (C-1_A), 80.9, 78.9, 77.0, 74.0, 73.7, 70.6 (6C, C-3_B, C-3_A, C-4_A, C-4_B, C-5_A and C-5_B), 61.0, 60.0 (2C, 2C-6), 55.4 (C-2_B), 53.5 (C-2_A), 23.0 (CH₃CO).

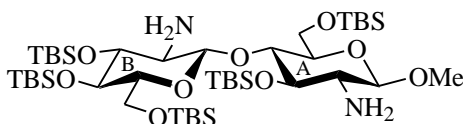
HRMS (ESI): m/z calcd for C₂₂H₃₂N₂NaO₁₀S[M+Na]⁺: 539.1670; found: 539.1659.

Mp: 268-269 °C

$[\alpha]_D^{24}$: -7.80 (c 0.8, DMSO).

R_f = 0.14 (90/10 CH₃CN/H₂O+ 1% NH₃)

Methyl (2-amino-3,4,6-tri-*O*-*tert*-butyldimethylsilyl-2-deoxy- β -D-glucopyranosyl)-(1 \rightarrow 4)-3,6-di-*O*-*tert*-butyldimethylsilyl-2-deoxy- β -D-glucopyranoside (210)



To a solution of **199** (50 mg, 0.141 mmol) in pyridine (0.7 mL) was added TBSOTf (490 μ L, 2.12 mmol, 15 eq) and a catalytic amount of DMAP. The reaction was stirred for 24 h at room temperature. The solvent was evaporated under reduced pressure and the residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc 7/3 to 5/5) to afford **210** (88 mg, 68%) as a colorless viscous liquid.

^1H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 4.48 (d, $J_{1B,2B}$ = 7.2 Hz, 1H, H-1_B), 4.08 (d, $J_{1A,2A}$ = 8.3 Hz, 1H, H-1_A), 4.00 (dd, $J_{6,6}$ = 11.4 Hz, $J_{6,5}$ = 1.4 Hz, 1H, H-6), 3.89 (dd, $J_{6,6}$ = 11.4 Hz, $J_{6,5}$ = 4.6 Hz, 1H, H-6), 3.86-3.80 (m, 1H, H-4_A or H-4_B), 3.80-3.74 (m, 1H, H-6), 3.74-3.64 (m, 3H, H-3_B, H-6, H-4_A or H-4_B), 3.60-3.53 (m, 1H, H-5_A or H-5_B), 3.48 (s, 3H, CH₃), 3.47-3.40 (m, 1H, H-3_A), 3.31-3.22 (m, 1H, H-5_A or H-5_B), 2.81-2.74 (m, 1H, H-2_B), 2.69 (t, $J_{2,3}$ = $J_{2,1}$ = 8.2 Hz, 1H, H-2_A), 0.93-0.84 (m, 45H, 5 *t*-Bu), 0.14 (s, 3H, SiCH₃), 0.11 (s, 3H, SiCH₃), 0.10 (s, 3H, SiCH₃), 0.09 (s, 9H, 3SiCH₃), 0.06 (s, 3H, SiCH₃), 0.04 (s, 3H, SiCH₃), 0.03 (s, 3H, SiCH₃), 0.02 (s, 3H, SiCH₃).

^{13}C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 104.4 (C-1_A), 102.9 (C-1_B), 80.9 (C-5_A or C-5_B), 79.3 (C-3_B), 77.0 (C-5_A or C-5_B), 76.4 (C-3_A), 74.7 (C-4_A or C-4_B), 71.5 (C-4_A or C-4_B), 64.0, 62.4 (2C, C-6_A and C-6_B), 59.1 (C-2_B), 58.4 (C-2_A), 56.7 (CH₃), 20.3 (*t*-Bu), 26.1 (*t*-Bu), 18.4 (C_q), 18.3 (C_q), 18.1 (C_q), -2.33 (SiCH₃), -3.64 (SiCH₃), -3.85 (SiCH₃), -3.94 (SiCH₃), -4.29 (SiCH₃), -4.76 (SiCH₃), -4.91 (SiCH₃), -5.16 (SiCH₃), -5.21 (SiCH₃).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₄₃H₉₆N₂HO₉Si₅[M+H]⁺: 925.6035; found: 925.6018.

R_f = 0.25 (90/10 Cyclohexane/EtOAc)

Experimental section

- **Procedure 6: General procedure for aldolisation in water**

To a solution of organocatalyst **183-190-194-199-203** (0.04 mmol, 20 mol %) in water (0.04M) were added 4-nitrobenzaldehyde (0.2 mmol), ketone (14 eq) and 4-nitrobenzoic acid (0.04 mmol). The resulting reaction mixture was stirred for an appropriate time (as mentioned in Tables 30, 32, 33 and 34) at room temperature. The reaction was monitored by TLC. After completion of the reaction, the reaction was neutralized with a saturated aqueous NaHCO₃ solution. The aqueous layer was extracted with EtOAc, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The crude mixture was submitted to ¹H NMR spectroscopy to get a diastereoisomeric ratio (syn/anti-products) and the yield with an internal standard (4-methoxybenzaldehyde). The HPLC analysis of the aldol products was performed with a chiral stationary phase with hexane-isopropanol (or ethanol) as the eluting solvent.

- **Procedure 7: General procedure for aldolisation with 206**

To a solution of organocatalyst **206** (0.04 mmol, 20 mol %) in solvent (0.03M, as mentioned in Table 29) were added 4-nitrobenzaldehyde (0.2 mmol), cyclohexanone (14 eq) and a co-catalyst (0.04 mmol, as mentioned in Table 29) and the resulting reaction mixture was stirred for 7 days at room temperature. The progress of the reaction was monitored by TLC. After completion of the reaction, the crude product was submitted to ¹H NMR spectroscopy to get a diastereomeric ratio (syn/anti products) and the yield with an internal standard (4-methoxybenzaldehyde). The HPLC analysis of the aldol products was performed on a chiral stationary phase with hexane-isopropanol as the eluting solvent.

- **Procedure 8: General procedure for the synthesis of aldol product 160**

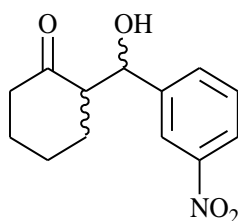
To a solution of organocatalyst **149-159-161-162-179** (0.04 mmol, 20 mol %) in cyclohexanone (14 eq) was added 4-nitrobenzaldehyde (0.2 mmol) and a co-catalyst (0.04 mmol, as mentioned in Tables 19, 20, 23, 24 and 26) and the resulting reaction mixture was stirred for appropriate time and temperature (as mentioned in Table 19, 20, 23, 24, 26). The reaction was monitored by TLC. The mixture was then diluted with CH₂Cl₂. The organic layer was successively washed with a saturated aqueous NaHCO₃ solution (to neutralize the co-catalyst), and brine, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The resulting residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 85/15) to afford **160** as a white solid.

- **Procedure 9: General procedure for Henry reaction with 203**

To a solution of organocatalyst **203** (0.04 mmol, 20 mol %) in brine (0.09M) were added 4-nitrobenzaldehyde (0.2 mmol), nitrométhane (0.4 mmol, 2 eq) and a co-catalyst (0.04 mmol, as mentioned in Table 36). the resulting reaction mixture was stirred for 3 days at room temperature. Then the mixture was extracted with CH₂Cl₂. The organic layer was successively washed with a saturated aqueous NaHCO₃ solution (to neutralize the co-catalyst) and brine, dried over Na₂SO₄, filtered and concentrated *in vacuo*. The resulting residue was purified by flash column chromatography on silica gel (cyclohexane/EtOAc: 90/10) to afford **223** (yield was mentioned Table 36) as a yellow solid.

Experimental section

2-[1'-Hydroxy-1'-(3''-nitrophenyl)methyl]cyclohexan-1-one (160)²⁴³



Obtained as a white solid according to procedure 8.

$R_f = 0.17$ (85/15 Cyclohexane/EtOAc)

Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

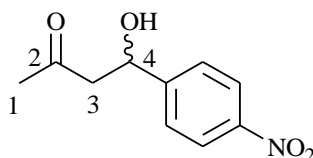
$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴³ δ ppm: 5.47 (br s, 1H, CH_{syn}), 4.89 (dd, $J = 4.6$ Hz, $J = 8.1$ Hz, 1H, CH_{anti}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{13}\text{H}_{15}\text{NNaO}_4[\text{M}+\text{Na}]^+$: 272.0893; found: 272.0890.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/ethyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 31.77$ and 34.75 min (*syn*), $t_R = 37.66$ and 47.75 min (*anti*).

4-Hydroxy-4-(4-nitro-phenyl)-butan-2-one (180)²⁴⁴



Obtained from acetone (119 μL , 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a white solid (92%) according to procedure 6.

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁴ δ ppm: 8.20 (d, $J = 8.6$ Hz, 2H, Ar-H), 7.53 (d, $J = 8.6$ Hz, 2H, Ar-H), 5.26 (br s, 1H, H-4), 3.61 (d, $J = 3.2$ Hz, 1H, OH), 2.88-2.81 (m, 2H, H-3), 2.22 (s, 3H, 3 H-1).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{NNaO}_4[\text{M}+\text{Na}]^+$: 232.0580; found: 232.0586.

$R_f = 0.14$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

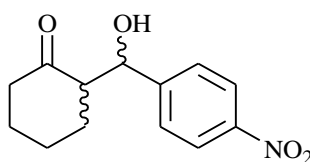
²⁴³ J. Agarwal, R. K. Peddinti, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 2012, 6390-6406.

²⁴⁴ B.-L. Zheng, Q.-Z. Liu, C.-S. Guo, X.-L. Wang, L. He, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, 5, 2913-2915.

Experimental section

Chiral HPLC analysis: CHIRALCEL OJ-H hexane/ethyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 270$ nm.
 $t_R = 29.43$ and 32.40 min.

2-[1'-Hydroxy-1'-(4''-nitrophenyl)methyl] cyclohexan-1-one (211)²⁴³



Obtained from cyclohexanone (167 μ L, 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (100%) according to procedure 6.

$R_f = 0.40$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

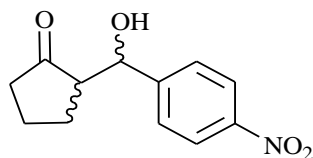
Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴³ δ ppm: 5.48 (br s, 1H, CH_{syn}), 4.89 (d, $J = 8.1$ Hz, 1H, CH_{anti});

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{13}\text{H}_{15}\text{NNaO}_4[\text{M}+\text{Na}]^+$: 272.0893; found: 272.0890.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/isopropyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.
 $t_R = 35.27$ and 37.80 min (*syn*), $t_R = 43.79$ and 54.62 min (*anti*).

2-[1'-Hydroxy-1'-(4''-nitrophenyl)methyl]cyclopent-1-one (212)²⁴³



Obtained from cyclopentanone (142 μ L, 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (70%) according to procedure 6.

$R_f = 0.34$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

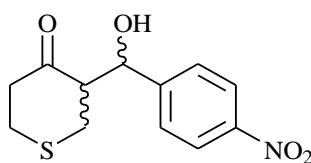
Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

Experimental section

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴³ δ ppm: 5.42 (br s, 1H, CH_{syn}), 4.84 (d, $J = 9.1$ Hz, 1H, CH_{anti});
HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{13}\text{NNaO}_4[\text{MH}]^+$: 234.0772; found: 234.0764.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/ethyl alcohol (80/20), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm. $t_{\text{R}} = 14.55$ and 29.21 min (*syn*), $t_{\text{R}} = 20.33$ and 39.25 min (*anti*).

3-[1'-Hydroxy-1'-(4-nitrophenyl)methyl]tetrahydrothiopyran-4-one (213)²⁴⁵



Obtained from tetrahydro-4H-thiopyran-4-one (187 mg, 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (100%) according to procedure 6.

$R_f = 0.65$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

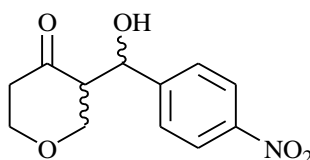
Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁵ δ ppm: 5.51 (br s, 1H, CH_{syn}), 5.05 (d, $J = 7.7$ Hz, 1H, CH_{anti});
HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{13}\text{NNaO}_4\text{S}[\text{M}+\text{Na}]^+$: 290.0457; found: 290.0447.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK AD-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_{\text{R}} = 35.05$ and 45.30 min (*syn*), $t_{\text{R}} = 67.25$ and 81.47 min (*anti*).²⁴⁵

3-[1'-Hydroxy-1'-(4-nitrophenyl)methyl]tetrahydropyran-4-one (214)²⁴⁵



Obtained from 4-oxotetrahydropyran (149 μL , 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a white solid (100%) according to procedure 6.

²⁴⁵ X.-W. Liu, T. N. Le, Y. Lu, Y. Xiao, J. Ma, X. Li, *Org. Biomol. Chem.* **2008**, 6, 3997-4003.

Experimental section

$R_f = 0.18$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

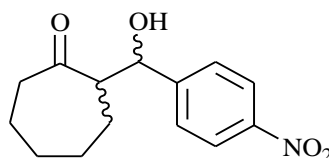
$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁵ δ ppm: 5.49 (t, $J = 3.5$ Hz, 1H, CH_{syn}), 4.99 (dd, $J = 8.2$ Hz, $J = 3.2$ Hz, 1H, CH_{anti}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{13}\text{NNaO}_5[M+\text{Na}]^+$: 274.0686; found: 274.0683.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK AD-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 35.25$ and 41.35 min (*syn*), $t_R = 54.52$ and 64.82 min (*anti*).²⁴⁵

2-[1'-Hydroxy-1'-(4''-nitrophenyl)methyl]cycloheptan-1-one (215)²⁴⁶



Obtained from cycloheptanone (190 μL , 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (100%) according to procedure 6.

$R_f = 0.34$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁶ δ ppm: 5.29 (br s, 1H, CH_{syn}), 4.91 (dd, $J = 4.6$ Hz, $J = 7.3$ Hz, 1H, CH_{anti}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{17}\text{NNaO}_4[M+\text{Na}]^+$: 286.1050; found: 286.1043.

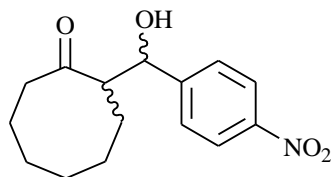
Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/isopropyl alcohol (80/20), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 10.63$ and 20.12 min (*syn*), $t_R = 22.25$ and 35.97 min (*anti*).

2-[1'-Hydroxy-1'-(4''-nitrophenyl)methyl]cyclooctan-1-one (216)²⁴⁷

²⁴⁶ Y. Wu, Y. Zhang, M. Yu, G. Zhao, S. Wang, *Org. Lett.* **2006**, 8, 4417-4420.

Experimental section



Obtained from cyclooctanone (212 μL , 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (100%) according to procedure 6.

$R_f = 0.76$ (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

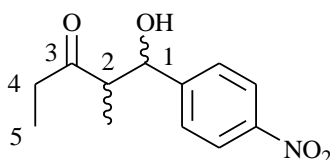
Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁷ δ ppm: 5.07 (d, $J = 3.6$ Hz, 1H, CH_{syn}), 4.93 (t, $J = 5.7$ Hz, 1H, CH_{anti}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{15}\text{H}_{19}\text{NNaO}_4[\text{M}+\text{Na}]^+$: 300.1206; found: 300.1221.

Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/isopropyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm. $t_R = 74.42$ and 83.90 min (*syn*), $t_R = 92.23$ and 117.92 min (*anti*).

1-Hydroxy-2-methyl-1-(4'-nitrophenyl)-pentan-3-one (217)²⁴⁸



Obtained from pentanone (171 μL , 14 eq) and 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.115 mmol) as a yellow solid (42%) according to procedure 6.

$R_f = 0.20$ (80/30 Cyclohexane/EtOAc)

Characteristic signals for *syn/anti* diastereoisomers:

$^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 360 MHz)²⁴⁸ δ ppm: 5.24 (br s, 1H, CH_{syn}), 4.88 (dd, $J = 7.7$ Hz, $J = 4.5$ Hz, 1H, CH_{anti}).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{15}\text{NaO}_4[\text{M}+\text{Na}]^+$: 260.0893; found: 260.0885.

Chiral HPLC analysis: CHIRALCEL OJ-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 0.8 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

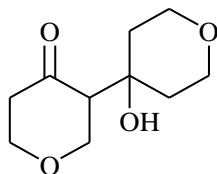
²⁴⁷ T. Kanemitsu, A. Umehara, M. Miyazaki, K. Nagata, T. Itoh, *Eur. J. Org. Chem.* **2011**, 2011, 993-997.

²⁴⁸ S. Singh Chimni, S. Singh, D. Mahajan, *Tetrahedron: Asymmetry* **2008**, 19, 2276-2284.

Experimental section

$t_R = 27.00$ and 29.02 min (*anti*), $t_R = 23.97$ and 31.93 min (*syn*)²⁴⁹.

4'-Hydroxy-octahydro-[3,4']bipyranyl-4-one (218)



To a solution of organocatalyst **183** (10 mg, 0.04 mmol, 20 mol %) in water (575 μ L, 0.04M) was added 4-nitrobenzaldehyde (17.4 mg, 0.2 mmol), 4-oxotetrahydropyran (149 μ L, 14 eq) and 4-nitrobenzoic acid (3.84 mg, 0.04 mmol, 20 mol %). The resulting reaction mixture was stirred for an appropriate time at room temperature and then diluted with CH_2Cl_2 . The organic layer was washed with water and the aqueous phase was extracted three times with CH_2Cl_2 . The combined organic layers were, dried over Na_2SO_4 , filtered and concentrated *in vacuo*. The residue was purified by flash column chromatography on silica gel (Cyclohexane/EtOAc: from 95/5 to 80/20 then 60/40) to afford **214** (100%) as a white solid and **218** (42 mg, 26%) as a colorless liquid.

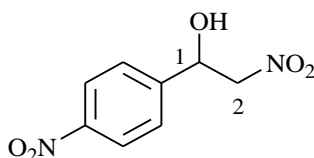
¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz) δ ppm: 4.28 (ddd, $J = 11.4$ Hz, $J = 5.8$ Hz, $J = 1.4$ Hz, 1H, CH₂), 4.24-4.14 (m, 1H, CH₂), 3.95-3.65 (m, 6H, 3CH₂), 3.43 (s, 1H, OH), 2.76-2.56 (m, 2H, CH₂ and CH), 2.46 (dt, $J = 7.2$ Hz, $J = 3.6$ Hz, 1H, CH₂), 1.90-1.49 (m, 4H, 2CH₂).

¹³C NMR (CDCl₃, 90 MHz) δ ppm: 210.3 (CO), 69.2 (CH₂), 69.1 (C_q), 68.7 (CH₂), 63.2 (CH₂), 59.9 (CH), 44.1(CH₂), 36.7 (CH₂), 34.7 (CH₂).

HRMS (ESI): m/z calcd for $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{NaO}_4$ [$M+\text{Na}$]⁺: 223.0941; found: 223.0943.

R_f = 0.39 (70/30 Cyclohexane/EtOAc)

1-(3-nitrophenyl)-2-nitroethanol (223)²⁵⁰



Obtained as a yellow solid according to procedure 9.

²⁴⁹ C.-S. Da, L.-P. Che, Q.-P. Guo, F.-C. Wu, M. Xiao, Y.-N. Jia, *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 2541-2546.

Experimental section

¹H NMR (CDCl₃, 360 MHz)²⁵⁰ δ ppm: 8.26 (d, J = 8.5 Hz, 2H, Ar-H), 7.53 (d, J = 8.5 Hz, 2H, Ar-H), 5.61 (dd, J = 7.5 Hz, J = 5.0 Hz, 1H, H-1), 4.65-4.51 (m, 2H, 2H-2), 3.22 (br s, 1H, OH).

HRMS (ESI): m/z calcd for C₈H₇N₂O₅[M -H]⁻: 211.0355; found: 211.0356

R_f = 0.21 (90/10 Cyclohexane/EtOAc)

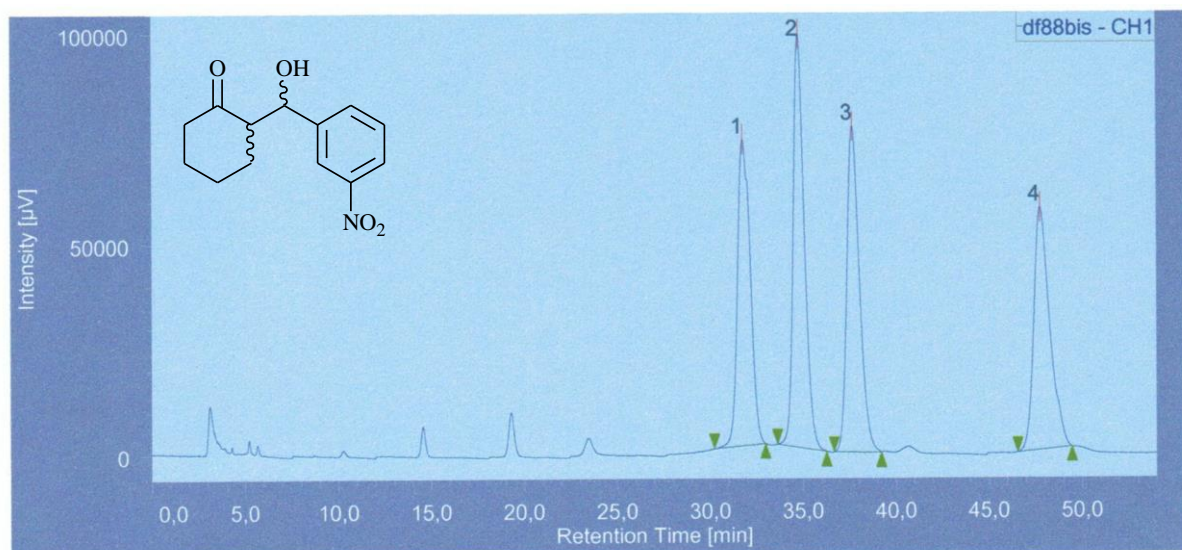
Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/isopropyl alcohol (85/15), 1 mL/min, λ = 254 nm.

t_R = 12.05 and 13.89 min.

²⁵⁰ M. N. Elinson, A. I. Ilovawasky, V. M. Merkulova, F. Barba, B. Batanero, *Tetrahedron* **2008**, *64*, 5915-5919.

Appendice

Appendice

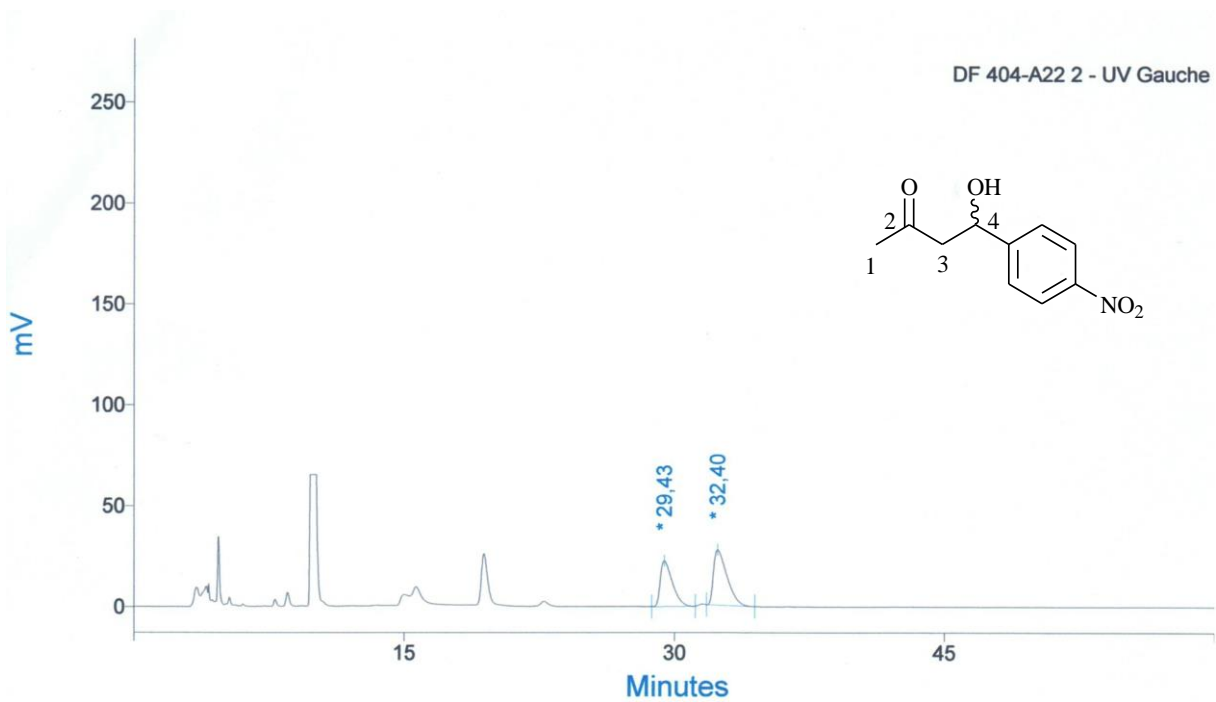


Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/ethyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 31.77$ and 34.75 min (*syn*), peaks 1 and 2

$t_R = 37.66$ and 47.75 min (*anti*), peaks 3 and 4.

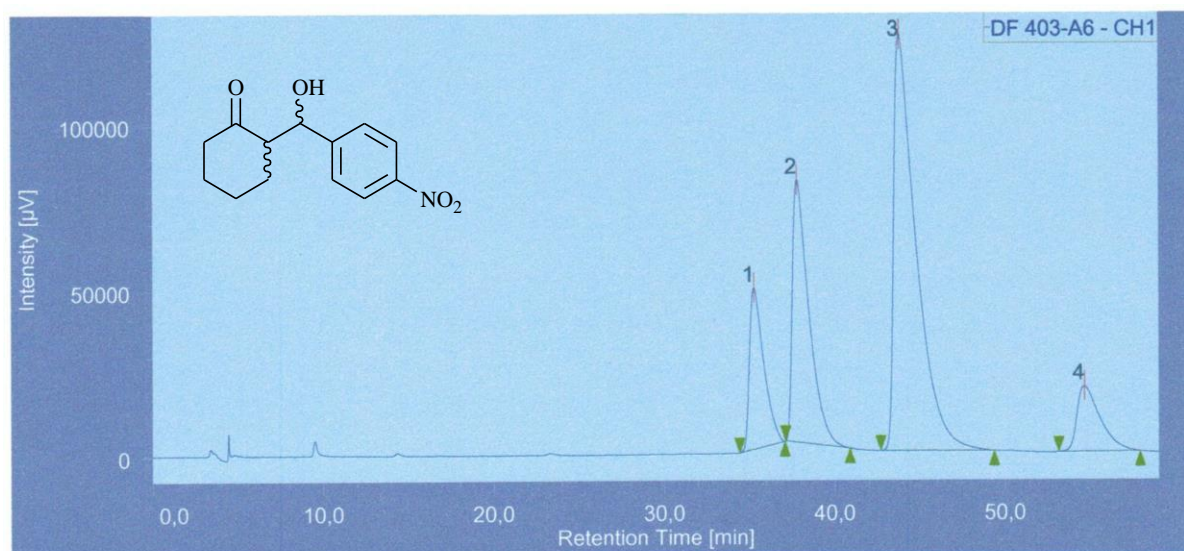
Appendice



Chiral HPLC analysis: CHIRALCEL OJ-H hexane/ethyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 270$ nm.

$t_R = 29.43$ and 32.40 min

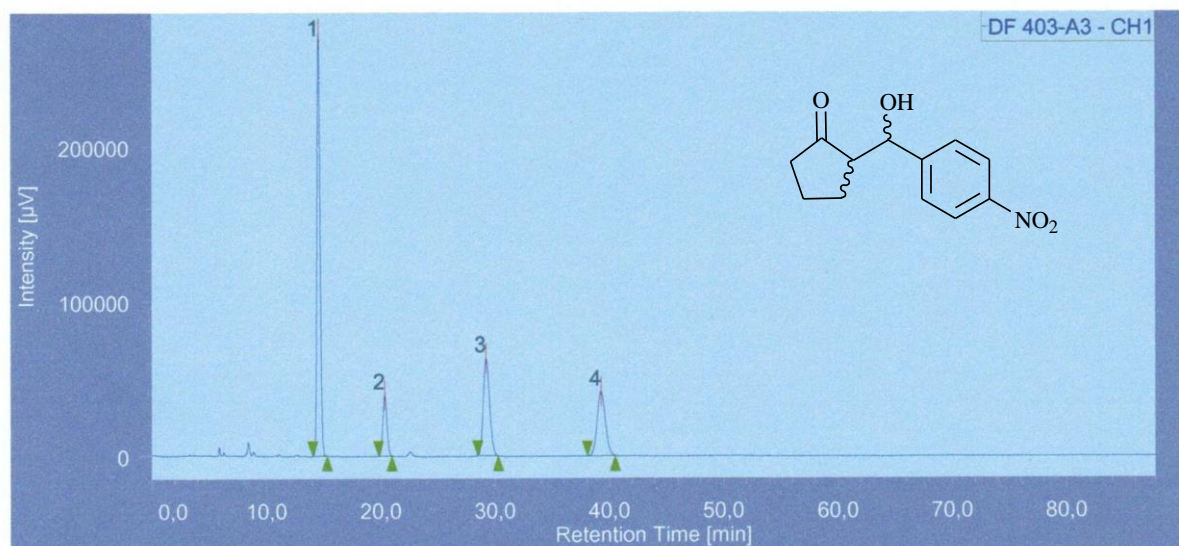
Appendice



Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/isopropyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 35.27$ and 37.80 min (*syn*), peaks 1 and 2.

$t_R = 43.79$ and 54.62 min (*anti*), peaks 3 and 4.

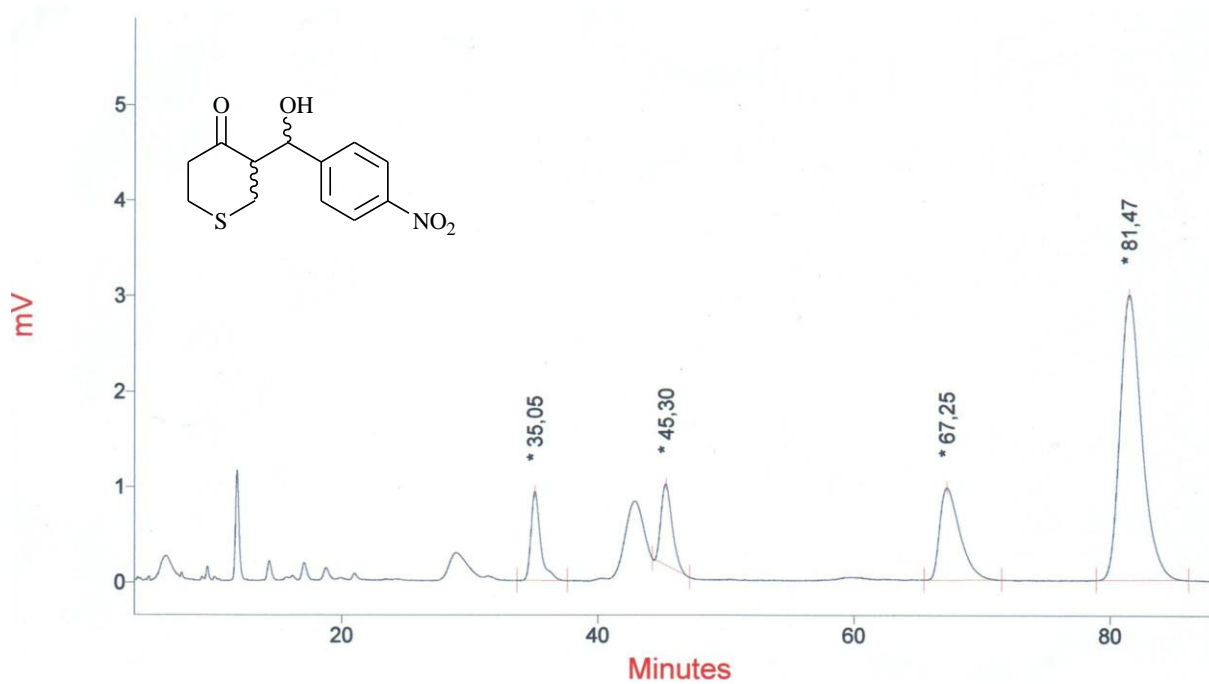


Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/ethyl alcohol (80/20), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 20.33$ and 39.25 min (*anti*), peaks 2 and 4.

$t_R = 14.55$ and 29.21 min (*syn*), peaks 1 and 3.

Appendice

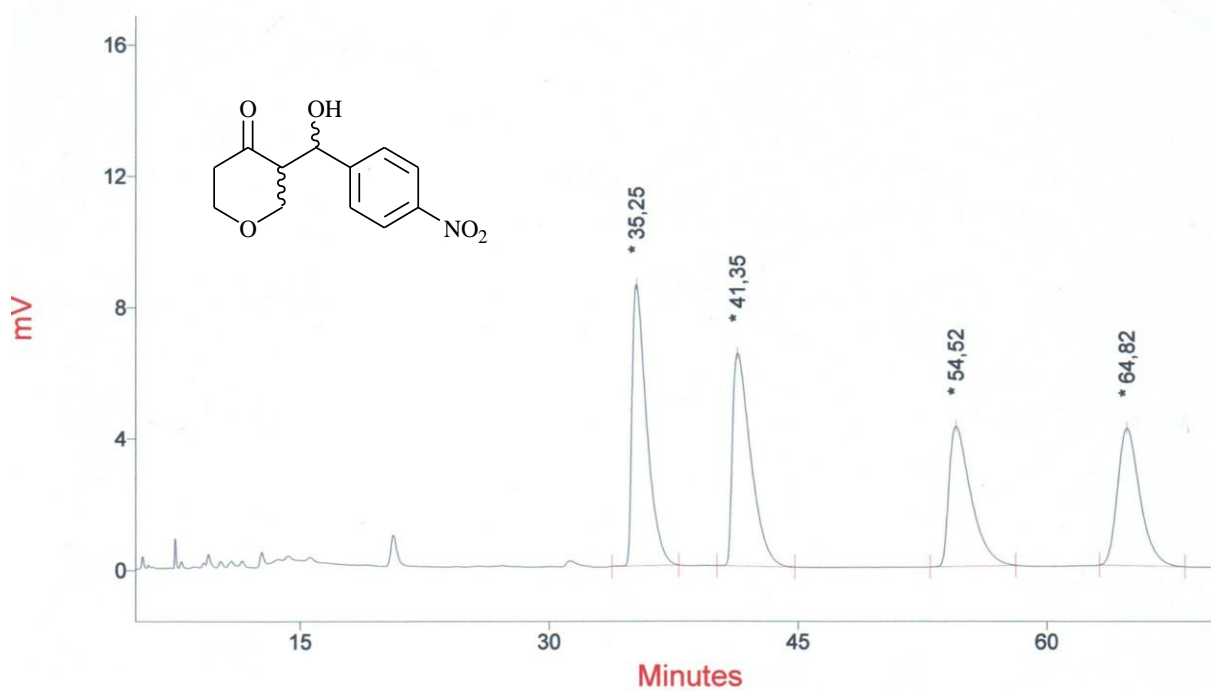


Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK AD-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 35.05$ and 45.30 min (*syn*), peaks 1 and 2.

$t_R = 67.25$ and 81.47 min (*anti*), peaks 3 and 4.

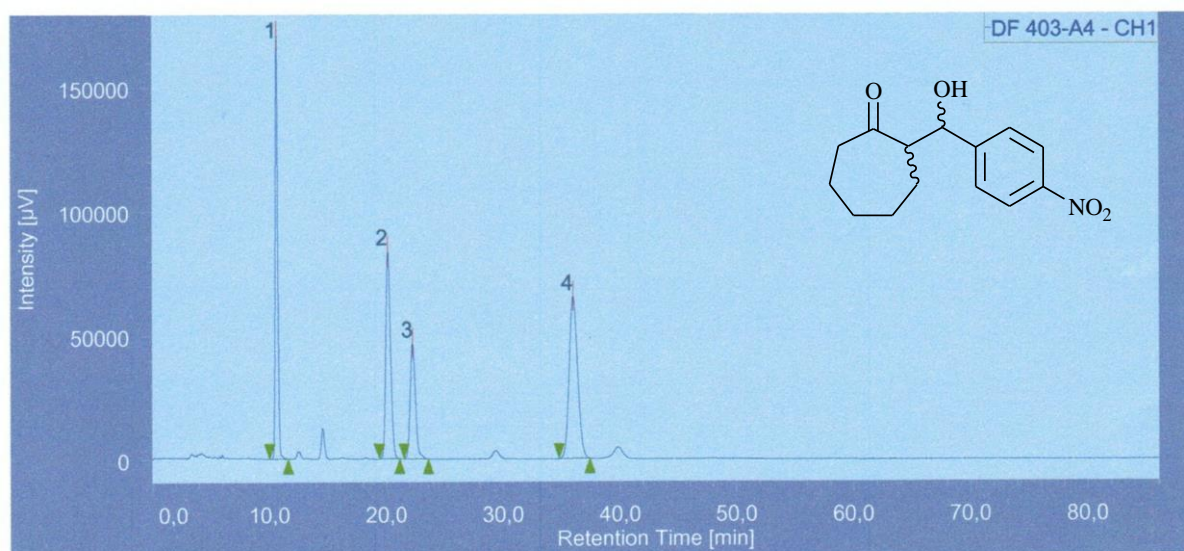
Appendice



Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK AD-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 35.25$ and 41.35 min (*syn*), peaks 1 and 2.

$t_R = 54.52$ and 64.82 min (*anti*), peaks 3 and 4.

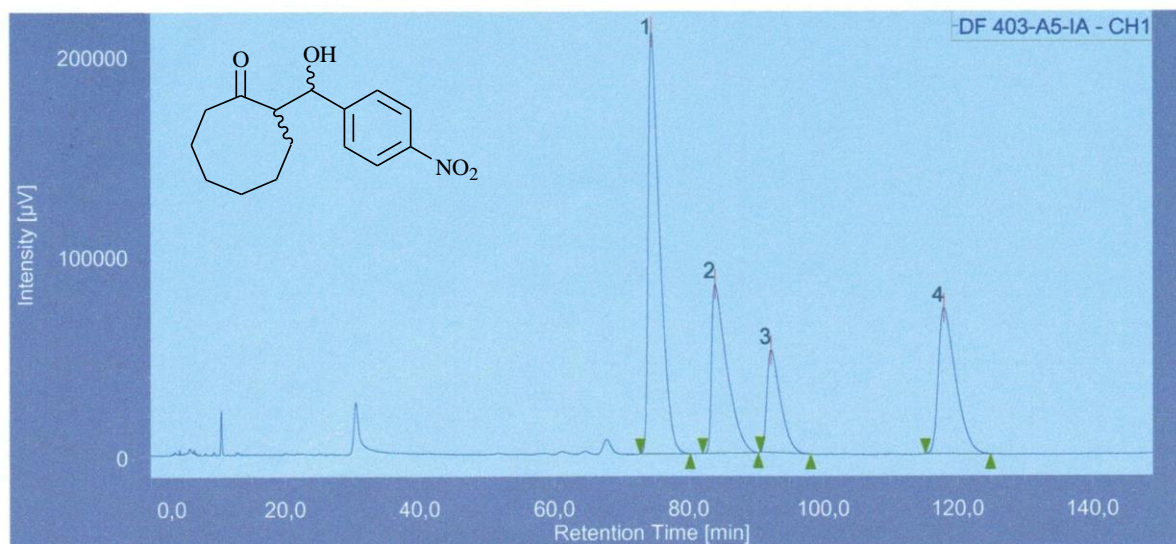


Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/isopropyl alcohol (80/20), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 10.63$ and 20.12 min (*syn*), peaks 1 and 2.

$t_R = 22.25$ and 35.97 min (*anti*), peaks 3 and 4.

Appendice

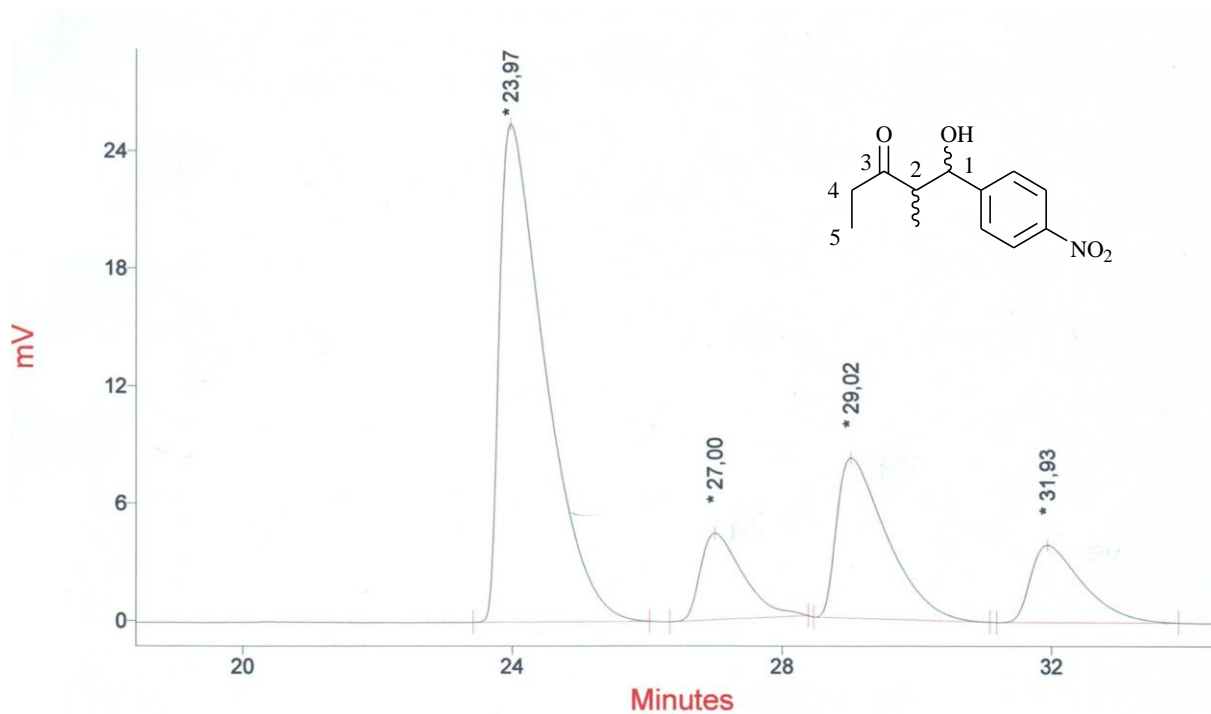


Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IA hexane/isopropyl alcohol (98/2), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 74.42$ and 83.90 min (*syn*), peaks 1 and 2.

$t_R = 92.23$ and 117.92 min (*anti*), peaks 3 and 4.

Appendice

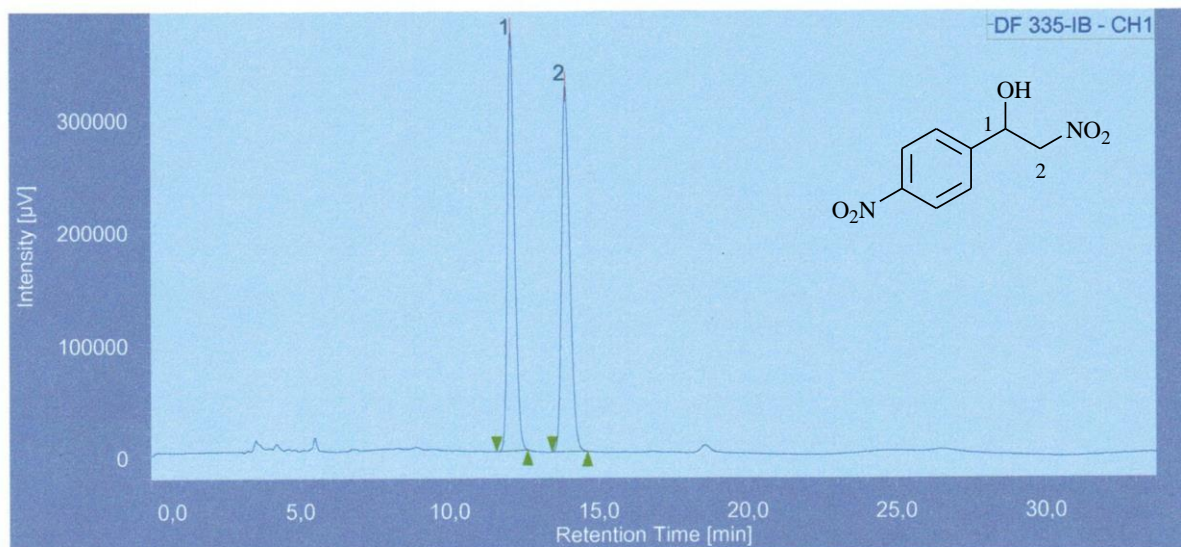


Chiral HPLC analysis: CHIRALCEL OJ-H hexane/isopropyl alcohol (90/10), 0.8 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 27.00$ and 29.02 min (*anti*), peaks 2 and 3.

$t_R = 23.97$ and 31.93 min (*syn*), peaks 1 and 4.

Appendice



Chiral HPLC analysis: CHIRALPAK IB hexane/isopropyl alcohol (85/15), 1 mL/min, $\lambda = 254$ nm.

$t_R = 12.05$ and 13.89 min.

Bibliographie

Bibliographie

- ¹ B. List, R. A. Lerner, C. F. Barbas, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 2395-2396.
- ² Pour des revues sur l'organocatalyse, voir: a) H. Pellissier, *Tetrahedron* **2007**, *63*, 9267-9331; b) P. I. Dalko, L. Moisan, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 5138-5175; c) J. Seayad, B. List, *Org. Biomol. Chem.* **2005**, *3*, 719-724.
- ³ K. A. Ahrendt, C. J. Borths, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 4243-4244.
- ⁴ G. Breeding, P.S. Fiske, *Biochem. Z.* **1912**, *46*, 7.
- ⁵ H. Pracejus, *Justus Liebigs Ann. Chem.* **1960**, *634*, 9-22.
- ⁶ U. Eder, G. Sauer, R. Wiechert, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1971**, *10*, 496-497.
- ⁷ Z. G. Hajos, D. R. Parrish, *J. Org. Chem.* **1974**, *39*, 1615-1621.
- ⁸ Pour des revues sur l'aminocatalyse, voir: a) B. List, *Chem. Commun.* **2006**, 819-824; b) P. Melchiorre, M. Marigo, A. Carlone, G. Bartoli, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2008**, *47*, 6138-6171; c) S. Bertelsen, K. A. Jørgensen, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 2178-2189; d) M. Nielsen, D. Worgull, T. Zweifel, B. Gschwend, S. Bertelsen, K. A. Jørgensen, *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 632-649; e) M. J. Gaunt, C. C. C. Johansson, A. McNally, N. T. Vo, *Drug Discovery Today* **2007**, *12*, 8-27.
- ⁹ a) B. List, *Acc. Chem. Res.* **2004**, *37*, 548-557; b) S. Mukherjee, J. W. Yang, S. Hoffmann, B. List, *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 5471-5569.
- ¹⁰ W. Notz, B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 7386-7387.
- ¹¹ B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 9336-9337.
- ¹² Pour une revue, voir: A. Erkkilä, I. Majander, P. M. Pihko, *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 5416-5470.
- ¹³ T. D. Beeson, A. Mastracchio, J.-B. Hong, K. Ashton, D. W. C. MacMillan, *Science* **2007**, *316*, 582-585.
- ¹⁴ B. List, *Tetrahedron* **2002**, *58*, 5573-5590.
- ¹⁵ L. Hoang, S. Bahmanyar, K. N. Houk, B. List, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *125*, 16-17.
- ¹⁶ W. Wang, H. Li, J. Wang, *Tetrahedron Lett.* **2005**, *46*, 5077-5079.
- ¹⁷ a) Y. Hayashi, H. Gotoh, T. Hayashi, M. Shoji, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 4212-4215; b) K. L. Jensen, G. Dickmeiss, H. Jiang, L. Albrecht, K. A. Jørgensen, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 248-264.
- ¹⁸ D. Font, C. Jimeno, M. A. Pericàs, *Org. Lett.* **2006**, *8*, 4653-4655.
- ¹⁹ G. Lelais, D. W. C. MacMillan, "History and perspective of chiral organic catalysts" in *New frontiers in asymmetric catalysis*, K. Mikami, M. Lautens, Eds., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, **2007**.
- ²⁰ M. Waser, "Asymmetric Organocatalysis in Natural Product Syntheses" -Progress in the Chemistry of Organic Natural Products, Vol. 96, A.D. Kinghorn, H. Falk, J. Kobayashi, Eds., Springer-Verlag, Wien, **2012**.
- ²¹ K. Draillard, J. Lebreton, J. Villiéras, *Tetrahedron: Asymmetry* **1999**, *10*, 4281-4284.
- ²² B. List, P. Pojarliev, C. Castello, *Org. Lett.* **2001**, *3*, 573-575.
- ²³ a) C. Agami, H. Sevestre, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1984**, 1385-1386; b) C. Agami, N. Platzer, H. Sevestre, *Bull. Soc. Chim. Fr.* **1987**, *2*, 358-360.
- ²⁴ C. Pidathala, L. Hoang, N. Vignola, B. List, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2003**, *42*, 2785-2788.
- ²⁵ V. B. Kurteva, C. A. M. Afonso, *Tetrahedron* **2005**, *61*, 267-273.
- ²⁶ B. List, *Synlett* **2001**, 1675-1686.
- ²⁷ S. Samanta, J. Liu, R. Dodda, C.-G. Zhao, *Org. Lett.* **2005**, *7*, 5321-5323.
- ²⁸ B. Wang, X.-w. Liu, L.-y. Liu, W.-x. Chang, J. Li, *Eur. J. Org. Chem.* **2010**, 5951-5954.
- ²⁹ X.-Y. Huang, H.-J. Wang, J. Shi, *J. Phys. Chem. A* **2009**, *114*, 1068-1081.
- ³⁰ D. Gryko, M. Chromiński, D. J. Pielacińska, Prolinethioamides versus Prolinamides in Organocatalyzed Aldol Reactions—A Comparative Study. *Symmetry* **2011**, *3*, 265-282.
- ³¹ P. M. Pihko, I. Majander, A. Erkkilä, "Enamine Catalysis" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2010**.

Bibliographie

- ³² a) S. Luo, H. Xu, J. Li, L. Zhang, J.-P. Cheng, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 3074-3075; b) S. S. V. Ramasastry, K. Albertshofer, N. Utsumi, C. F. Barbas, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 1621-1624.
- ³³ Y. Hayashi, T. Sumiya, J. Takahashi, H. Gotoh, T. Urushima, M. Shoji, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 958-961.
- ³⁴ S. Samanta, C.-G. Zhao, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 7442-7443.
- ³⁵ O. Tokuda, T. Kano, W.-G. Gao, T. Ikemoto, K. Maruoka, *Org. Lett.* **2005**, *7*, 5103-5105.
- ³⁶ C. H. Senanayake, K. Fang, P. Grover, R. P. Bakale, C. P. Vandebossche, S. A. Wald, *Tetrahedron Lett.* **1999**, *40*, 819-822.
- ³⁷ A. B. Northrup, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 6798-6799.
- ³⁸ X.-H. Cai, H. Guo, B. Xie, *Eur. J. Chem.* **2012**, *3*, 258-266.
- ³⁹ A. Berkessel, H. Groger, D. MacMillan "Asymmetric Organocatalysis: From Biomimetic Concepts to Applications in Asymmetric Synthesis", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, **2005**.
- ⁴⁰ A. Córdova, S.-i Watanabe, F. Tanaka, W. Notz, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 1866-1867.
- ⁴¹ Y. Hayashi, J. Yamaguchi, K. Hibino, T. Sumiya, T. Urushima, M. Shoji, D. Hashizume, H. Koshino, *Adv. Synth. Catal.* **2004**, *346*, 1435-1439.
- ⁴² N. S. Chowdari, M. Ahmad, K. Albertshofer, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *Org. Lett.* **2006**, *8*, 2839-2842.
- ⁴³ a) R. Martín-Rapún, X. Fan, S. Sayalero, M. Bahramnejad, F. Cuevas, M. A. Pericàs, *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 8780-8783; b) H. Zhang, S. Mitsumori, N. Utsumi, M. Imari, N. Garcia-Delgado, M. Mifsud, K. Albertshofer, P. H.-Y. Cheong, K. N. Houk, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 875-886 ; c) L. Cheng, X. Wu, Y. Lu, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, *5*, 1018-1020 ; d) H. Zhang, M. Mifsud, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 9630-9631 ; e) T. Kano, Y. Hato, K. Maruoka, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 8467-8469 ; f) A. Córdova, C. F. Barbas III, *Tetrahedron Lett.* **2002**, *43*, 7749-7752.
- ⁴⁴ S. Mitsumori, H. Zhang, P. Ha-Yeon Cheong, K. N. Houk, F. Tanaka, C. F. Barbas III, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 1040-1041.
- ⁴⁵ M. Pouliquen, J. Blanchet, M.-C. Lasne, J. Rouden, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 1029-1032.
- ⁴⁶ M. Yus, J. C. González-Gómez, F. Foubelo, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 7774-7854.
- ⁴⁷ M. Colladon, A. Scarso, P. Sgarbossa, R. A. Michelin, G. Strukul, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 14006-14007.
- ⁴⁸ X. Cui, K. Burgess, *Chem. Rev.* **2005**, *105*, 3272-3296.
- ⁴⁹ Y. A. Lin, B. G. Davis, *Beilstein J. Org. Chem.* **2010**, *6*, 1219-1228.
- ⁵⁰ I. Ibrahim, A. Córdova, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 1952-1956.
- ⁵¹ J. J. Devery, J. C. Conrad, D. W. C. MacMillan, R. A. Flowers, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 6106-6110.
- ⁵² R. Beel, S. Kobialka, M. L. Schmidt, M. Engeser, *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 3293-3295.
- ⁵³ H. Kim, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *130*, 398-399.
- ⁵⁴ a) M. Amatore, T. D. Beeson, S. P. Brown, D. W. C. MacMillan, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 5121-5124; b) M. P. Brochu, S. P. Brown, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 4108-4109.
- ⁵⁵ J. E. Wilson, A. D. Casarez, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 11332-11334.
- ⁵⁶ A. Mastracchio, A. A. Warkentin, A. M. Walji, D. W. C. MacMillan, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **2010**, *107*, 20648-20651.
- ⁵⁷ D. A. Nicewicz, D. W. C. MacMillan, *Science* **2008**, *322*, 77-80.
- ⁵⁸ P. Renaud, P. Leong, *Science* **2008**, *322*, 55-56.
- ⁵⁹ John B. Brazier, Nicholas C.O. Tomkinson, "Secondary and Primary Amine Catalysts for Iminium Catalysis" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2010**.

Bibliographie

- ⁶⁰ M.-Y. Han, Y. Zhang, H.-Z. Wang, W.-K. An, B.-C. Ma, Y. Zhang, W. Wang, *Adv. Synth. Catal.* **2012**, *354*, 2635-2640.
- ⁶¹ L.-W. Xu, J. Luo, Y. Lu, *Chem. Commun.* **2009**, 1807-1821.
- ⁶² Pour des revues, voir: a) B. D. Mather, K. Viswanathan, K. M. Miller, T. E. Long, *Prog. Polym. Sci.* **2006**, *31*, 487-531; b) Y. Zhang, W. Wang, *Catal. Sci. Technol.* **2012**, *2*, 42-53.
- ⁶³ S. H. McCooey, S. J. Connon, *Org. Lett.* **2007**, *9*, 599-602.
- ⁶⁴ A. Avila, R. Chinchilla, B. Fiser, E. Gómez-Bengoa, C. Nájera, *Tetrahedron: Asymmetry* **2014**, *25*, 462-467.
- ⁶⁵ P. Galzerano, G. Bencivenni, F. Pesciaoli, A. Mazzanti, B. Giannichi, L. Sambri, G. Bartoli, P. Melchiorre, *Chem. Eur. J.* **2009**, *15*, 7846-7849.
- ⁶⁶ W. Wu, X. Li, H. Huang, X. Yuan, J. Lu, K. Zhu, J. Ye, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 1743-1747.
- ⁶⁷ K. M. Lokanatha Rai, "Heterocycles via Oxime Cycloadditions" in *Synthesis of Heterocycles via Cycloadditions I- Topics in Heterocyclic Chemistry*, Vol. 12, A. Hassner, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2008**
- ⁶⁸ A. B. Northrup, D. W. C. MacMillan, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 2458-2460.
- ⁶⁹ K. Ishihara, K. Nakano, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 10504-10505.
- ⁷⁰ A. Sakakura, K. Suzuki, K. Ishihara, *Adv. Synth. Catal.* **2006**, *348*, 2457-2465.
- ⁷¹ W. Chen, W. Du, Y.-Z. Duan, Y. Wu, S.-Y. Yang, Y.-C. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 7667-7670.
- ⁷² N. Dwivedi, S. S. Bisht, R. P. Tripathi, *Carbohydr. Res.* **2006**, *341*, 2737-2743.
- ⁷³ N. Singh, J. Pandey, R. P. Tripathi, *Catal. Commun.* **2008**, *9*, 743-746.
- ⁷⁴ T. Heckel, D. D. Konieczna, R. Wilhem, *Catalysts* **2013**, *3*, 914-921.
- ⁷⁵ C. Gioia, A. Ricci, L. Bernardi, K. Bourahla, N. Tanchoux, M. Robitzer, F. Quignard, *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 588-594.
- ⁷⁶ a) G. C. Fu, *J. Org. Chem.* **2004**, *69*, 3245-3249; b) T. Ikariya, K. Murata, R. Noyori, *Org. Biomol. Chem.* **2006**, *4*, 393-406.
- ⁷⁷ H. C. Aspinall, *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 1807-1850.
- ⁷⁸ S. E. Denmark, T. Wynn, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 6199-6200.
- ⁷⁹ M. Johannsen, K. A. Jørgensen, G. Helmchen, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 7637-7638.
- ⁸⁰ M. Terada, M. Kouchi, *Tetrahedron* **2006**, *62*, 401-409.
- ⁸¹ J. S. Yadav, B. V. S. Reddy, G. Baishya, *J. Org. Chem.* **2003**, *68*, 7098-7100.
- ⁸² A. Brunner, S. Taudien, O. Riant, H. B. Kagan, *Chirality* **1997**, *9*, 478-486.
- ⁸³ S. E. Denmark, G. L. Beutner, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 1560-1638.
- ⁸⁴ T. Werner, *Adv. Synth. Catal.* **2009**, *351*, 1469-1481.
- ⁸⁵ C. J. Abraham, D. H. Paull, C. Dogo-Isonagie, T. Lectka, *Synlett* **2009**, 1651-1654.
- ⁸⁶ C.-L. Zhu, F.-G. Zhang, W. Meng, J. Nie, D. Cahard, J.-A. Ma, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 5869-5872.
- ⁸⁷ O. Sereda, S. Tabassum, R. Wilhelm, "Lewis Acid Organocatalysts" in *Asymmetric organocatalysis-Topics in Current Chemistry*, Vol. 291, B. List, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2010**.
- ⁸⁸ C.-T. Chen, S.-D. Chao, K.-C. Yen, C.-H. Chen, I.-C. Chou, S.-W. Hon, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 11341-11342.
- ⁸⁹ a) P. R. Schreiner, *Chem. Soc. Rev.* **2003**, *32*, 289-296; b) H. Klare, J. M. Neudörfl, B. Goldfuss, *Beilstein J. Org. Chem.* **2014**, *10*, 224-236; c) L. Albrecht, H. Jiang, K. A. Jørgensen, *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 358-368.
- ⁹⁰ P. Vachal, E. N. Jacobsen, *Org. Lett.* **2000**, *2*, 867-870.
- ⁹¹ Z. Zhang, P. R. Schreiner, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 1187-1198.
- ⁹² E. J. Corey, M. J. Grogan, *Org. Lett.* **1999**, *1*, 157-160.
- ⁹³ T. Schuster, M. Bauch, G. Dürner, M. W. Göbel, *Org. Lett.* **2000**, *2*, 179-181.

Bibliographie

- ⁹⁴ M. De Rosa, L. Citro, A. Soriente, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 8507-8510.
- ⁹⁵ K. Ágoston, P. Fügedi, *Carbohydr. Res.* **2014**, *389*, 50-56.
- ⁹⁶ A. Puglisi, M. Benaglia, L. Raimondi, L. Lay, L. Poletti, *Org. Biomol. Chem.* **2011**, *9*, 3295-3302.
- ⁹⁷ A. Szabolcs, M. Molnár, G. Dibó, L. T. Mika, *Green Chem.* **2013**, *15*, 439-445.
- ⁹⁸ C.-H. Zhou, X. Xia, C.-X. Lin, D.-S. Tong, J. Beltramini, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 5588-5617.
- ⁹⁹ I. E. Agency, OECD/IEA, **2012** edn, **2012**.
- ¹⁰⁰ T. W. R. Powell, T. M. Lenton, *Energy Environ. Sci.* **2012**, *5*, 8116-8133.
- ¹⁰¹ Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes, *Science* **2011**, *333*, 988-993.
- ¹⁰² D. L. Klass, *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*, Elsevier, Amsterdam, **1998**.
- ¹⁰³ C. Liu, H. Wang, A. M. Karim, J. Sun, Y. Wang, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, DOI: 10.1039/C3CS60414D.
- ¹⁰⁴ Y. Nishiyama, J. Sugiyama, H. Chanzy, P. Langan, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 14300-14306.
- ¹⁰⁵ F. Shahidi, J. K. V. Arachchi, Y.-J. Jeon, *Trends Food Sci. Technol.* **1999**, *10*, 37-51.
- ¹⁰⁶ H. Braconnot, *Ann. Chim. Phys.*, **1811**, *79*, 265-304.
- ¹⁰⁷ C. Wang, A. R. Esker, *Carbohydr. Polym.* **2014**, *102*, 151-158.
- ¹⁰⁸ a) X. Chen, S. L. Chew, F. M. Kerton, N. Yan, *Green Chem.* **2014**, *16*, 2204-2212; b) M. Rinaudo, *Prog. Polym. Sci.* **2006**, *31*, 603-632.
- ¹⁰⁹ a) Y. Dong, C. Xu, J. Wang, Y. Wu, M. Wang, Y. Ruan, *J. Appl. Polym. Sci.* **2002**, *83*, 1204-1208; b) S. P. Campana-Filho, D. d. Britto, E. Curti, F. R. Abreu, M. B. Cardoso, M. V. Battisti, P. C. Sim, R. C. Goy, R. Signini, R. L. Lavall, *Quim. Nova* **2007**, *30*, 644-650.
- ¹¹⁰ J. Kumirska, M. Czerwicka, Z. Kaczyński, A. Bychowska, K. Brzozowski, J. Thöming, P. Stepnowski, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 1567-1636.
- ¹¹¹ Y. Saito, J. L. Putaux, T. Okano, F. Gaill, H. Chanzy, *Macromolecules* **1997**, *30*, 3867-3873.
- ¹¹² K. M. Rudall, *J. Polym. Sci., Part C: Polym. Symp.* **1969**, *28*, 83-102.
- ¹¹³ E. Atkins, *J. Biosci.* **1985**, *8*, 375-387.
- ¹¹⁴ R. N. Tharanathan, F. S. Kittur, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2003**, *43*, 61-87.
- ¹¹⁵ R. Flores, S. Barrera-Rodríguez, K. Shirai, C. Durán-de-Bazúa, *J. Appl. Polym. Sci.* **2007**, *104*, 3909-3916.
- ¹¹⁶ C. K. S. Pillai, W. Paul, C. P. Sharma, *Prog. Polym. Sci.* **2009**, *34*, 641-678.
- ¹¹⁷ a) M. Rinaudo, G. Pavlov, J. Desbrières, *Polymer* **1999**, *40*, 7029-7032; b) K. M. Kim, J. H. Son, S.-K. Kim, C. L. Weller, M. A. Hanna, *J. Food Sci.* **2006**, *71*, E119-E124.
- ¹¹⁸ C. Kienzle-Sterzer, D. Rodriguez-Sanchez, C. Rha, *J. Appl. Polym. Sci.* **1982**, *27*, 4467-4470.
- ¹¹⁹ a) M. M. Issa, M. Köping-Höggård, P. Artursson, *Drug Discov. Today Techn.* **2005**, *2*, 1-6; b) A. El Hadrami, L. R. Adam, I. El Hadrami, F. Daayf, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 968-987.
- ¹²⁰ J. Z. Knaul, S. M. Hudson, K. A. M. Creber, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* **1999**, *37*, 1079-1094.
- ¹²¹ E. Onsosen, O. Skaugrud, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1990**, *49*, 395-404.
- ¹²² M. L. Tsaih, R. H. Chen, *J. Appl. Polym.* **2003**, *88*, 2917-2923.
- ¹²³ C. K. S. Pillai, W. Paul, C. P. Sharma, "Chitosan: manufacture, properties and uses" in Chitosan: manufacture, properties, and usage- Biotechnology in Agriculture, Industry and Medicine, Samuel P. Davis, Eds., Nova Science Publishers, inc, New york, **2011**.
- ¹²⁴ a) T. K. Sini, S. Santhosh, P. T. Mathew, *Carbohydr. Res.* **2007**, *342*, 2423-2429; b) I. Tsigos, A. Martinou, D. Kafetzopoulos, V. Bouriotis, *Trends Biotechnol.* **2000**, *18*, 305-312.

Bibliographie

- ¹²⁵ a) G. Lodhi, Y.-S. Kim, J.-W. Hwang, S.-K. Kim, Y.-J. Jeon, J.-Y. Je, C.-B. Ahn, S.-H. Moon, B.-T. Jeon, P.-J. Park, *BioMed. Res. Int.* **2014**, article ID 654913.
- ¹²⁶ S.-K. Kim, N. Rajapakse, *Carbohydr. Polym.* **2005**, *62*, 357-368.
- ¹²⁷ a) P. Lerouge, P. Roche, C. Faucher, F. Maillat, G. Truchet, J.-C. Promé, J. Dénarié *Nature*, **1990**, *344*, 781; b) G. Truchet, P. Roche, P. Lerouge, J. Vasse, S. Camut, F. de Billy, J.-C. Promé, J. Dénarié *Nature*, **1991**, *351*, 670. Pour des revues, voir: c) J. Dénarié, F. Debellé, J.-C. Promé, *Annu. Rev. Biochem.* **1996**, *65*, 503; d) S. R. Long, *Plant Cell* **1996**, *8*, 1885; H. P. Spaink, *Annu. Rev. Microbiol.* **1998**, *54*, 257; e) J.-M. Beau, *Chimia* **2011**, *65*, 45-48.
- ¹²⁸ Pour une revue récente, voir: Y. Yang, B. Yu, *Tetrahedron* **2014**, *70*, 1023-1046.
- ¹²⁹ a) Y. J. Jeon, F. Shahidi, S.-K. Kim, *Food Rev. Int.* **2000**, *16*, 159-176; b) B. B. Aam, E. B. Heggset, A. L. Norberg, M. Sørli, K. M. Vårum, V. G. H. Eijsink, *Mar. Drugs* **2010**, *8*, 1482-1517.
- ¹³⁰ F. Tian, Y. Liu, K. Hu, B. Zhao, *Journal of Materials Science* **2003**, *38*, 4709-4712.
- ¹³¹ K. V. Harish Prashanth, S. M. Dharmesh, K. S. Jagannatha Rao, R. N. Tharanathan, *Carbohydr. Res.* **2007**, *342*, 190-195.
- ¹³² V. K. Mourya, N. N. Inamdar, Y. M. Choudhari, *Polym. Sci. Ser. A* **2011**, *53*, 583-612.
- ¹³³ A. Domard, N. Cartier, *Int. J. Biol. Macromol.* **1989**, *11*, 297-302.
- ¹³⁴ E. Furusaki, Y. Ueno, N. Sakairi, N. Nishi, S. Tokura, *Carbohydr. Polym.* **1996**, *29*, 29-34.
- ¹³⁵ Z. Jia, D. Shen, *Carbohydr. Polym.* **2002**, *49*, 393-396.
- ¹³⁶ J. Defaye, A. Gadelle, C. Pedersen, *Carbohydr. Res.* **1994**, *261*, 267-277.
- ¹³⁷ S. T. Horowitz, S. Roseman, H. J. Blumenthal, *J. Am. Chem. Soc.* **1957**, *79*, 5046-5049.
- ¹³⁸ M. Falk, D. G. Smith, J. McLachlan, A. G. McInnes, *Can. J. Chem.* **1966**, *44*, 2269-2281.
- ¹³⁹ a) A. Einbu, H. Grasdalen, K. M. Vårum, *Carbohydr. Res.* **2007**, *342*, 1055-1062; b) K. M. Vårum, M. H. Ottøy, O. Smidsrød, *Carbohydr. Polym.* **2001**, *46*, 89-98.
- ¹⁴⁰ a) K. Nagasawa, Y. Tohira, Y. Inoue, N. Tanoura, *Carbohydr. Res.* **1971**, *18*, 95-102; b) K. Nagasawa, N. Tanoura, *Chem. Pharm. Bull.* **1972**, *20*, 157-162.
- ¹⁴¹ a) M. Bergmann, L. Zervas, E. Silberkweit, *Ber.* **1931**, *64*, 2436-2440; b) S. A. Barker, A. B. Foster, M. Stacey, J. M. Webber, *J. Chem. Soc.* **1958**, 2218-2227; c) T. Osawa, *Carbohydr. Res.* **1966**, *1*, 435-443; d) M. Spinola, R. W. Jeanloz, *J. Biol. Chem.* **1970**, *245*, 4158-4162; e) M. Schaban, R. W. Jeanloz, *Carbohydr. Res.* **1971**, *19*, 311-318; f) R. Otson, C. Reyes-Zamora, J. Y. Tang, C. S. Tsai, *Can. J. Biochem.* **1973**, *51*, 1-6; g) S.-I. Nishimura, H. Kuzuhara, Y. Takiguchi, K. Shimahara, *Carbohydr. Res.* **1989**, *194*, 223-231; h) R. Chang, A. R. Yeager, N. S. Finney, *Org. Biomol. Chem.* **2003**, *1*, 39-41; i) M. Mathiselvam, A. Srivastava, B. Varghese, S. Pérez, *Carbohydr. Res.* **2013**, *380*, 37-44.
- ¹⁴² F. M. Delmotte, M. L. P. Monsigny, *Carbohydr. Res.* **1974**, *36*, 219-226.
- ¹⁴³ T. Inaba, T. Ohgushi, Y. Iga, E. Hasegawa, *Chem. Pharm. Bull.* **1984**, *32*, 1597-1603.
- ¹⁴⁴ S.-I. Nishimura, H. Kuzuhara, Y. Takiguchi, K. Shimahara, *Carbohydr. Res.* **1989**, *194*, 223-231.
- ¹⁴⁵ K. Kurita, K. Tomita, S. Ishii, S.-I. Nishimura, K. Shimoda, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* **1993**, *31*, 2393-2395.
- ¹⁴⁶ F. Shahidi, R. Abuzaytoun, *Adv. Food. Nutr. Res.* **2005**, *49*, 93-135.
- ¹⁴⁷ J. C. Cabrera, P. Van Cutsem, *Biochem. Eng. J.* **2005**, *25*, 165-172.
- ¹⁴⁸ L. Ramírez-Coutiño, M. d. C. Marín-Cervantes, S. Huerta, S. Revah, K. Shirai, *Process Biochem.* **2006**, *41*, 1106-1110.
- ¹⁴⁹ R. Yoksan, M. Akashi, M. Miyata, S. Chirachanchai, *Radiat. Res.* **2004**, *161*, 471-480.
- ¹⁵⁰ E. W. Thomas, *Carbohydr. Res.* **1973**, *26*, 225-226.
- ¹⁵¹ Ce protocole modifié a été initialement mis au point dans le laboratoire par Aurélien Alix.
- ¹⁵² G. Despras, A. Alix, D. Urban, B. Vauzeilles, J.-M. Beau, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **2014**, *53*, 11912-11916.

Bibliographie

- ¹⁵³ A. V. Demchenko, "General Aspects of the Glycosidic Bond Formation" in *Handbook of Chemical Glycosylation: Advances in Stereoselectivity and Therapeutic Relevance*, A.V. Demchenko, Eds., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, **2008**.
- ¹⁵⁴ L. K. Mydock, A. V. Demchenko, *Org. Biomol. Chem.* **2010**, *8*, 497-510.
- ¹⁵⁵ I. Tvaroška, T. Bleha, in *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.*, Vol. 47 (Eds.: R. S. Tipson, H. Derek), Academic Press, 1989, pp. 45-123.
- ¹⁵⁶ a) A. V. Demchenko, *Synlett* **2003**, 1225-1240; b) A. V. Demchenko, *Curr. Org. Chem.* **2003**, *7*, 35-79.
- ¹⁵⁷ C. O. Kappe, *Chem. Soc. Rev.* **2008**, *37*, 1127-1139.
- ¹⁵⁸ Ü. Yılmaz, H. Küçükbay, S. Deniz, N. Şireci, *Molecules* **2013**, *18*, 2501-2517.
- ¹⁵⁹ A. de la Hoz, A. Diaz-Ortiz, A. Moreno, *Chem. Soc. Rev.* **2005**, *34*, 164-178.
- ¹⁶⁰ S. Mandal, N. Sharma, B. Mukhopadhyay, *Synlett* **2009**, 3111-3114.
- ¹⁶¹ H. Christensen, M. S. Christiansen, J. Petersen, H. H. Jensen, *Org. Biomol. Chem.* **2008**, *6*, 3276-3283.
- ¹⁶² A. Stévenin, F.-D. Boyer, J.-M. Beau, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 1699-1702.
- ¹⁶³ A. Xolin, A. Stévenin, M. Pucheault, S. Norsikian, F.-D. Boyer, J.-M. Beau, *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 992-1000.
- ¹⁶⁴ a) B. Bhatt, R. Böhm, P. S. Kerry, J. C. Dyason, R. J. M. Russell, R. J. Thomson, M. von Itzstein, *J. Med. Chem.* **2012**, *55*, 8963-8968; b) J.-L. de Paz, R. Ojeda, Á. G. Barrientos, S. Penadés, M. Martín-Lomas *Tetrahedron: Asymmetry* **2005**, *16*, 149-158.
- ¹⁶⁵ T. Buskas, P. J. Garegg, P. Konradsson, J.-L. Maloisel, *Tetrahedron: Asymmetry* **1994**, *5*, 2187-2194.
- ¹⁶⁶ a) H. Bock, R. Dammel, *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, *110*, 5261-5269; b) H. Bock, R. Dammel, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1987**, *26*, 504-526.
- ¹⁶⁷ A. A. Joseph, V. P. Verma, X.-Y. Liu, C.-H. Wu, V. M. Dhurandhare, C.-C. Wang, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 744-753.
- ¹⁶⁸ H. Yamada, T. Hayashi, *Carbohydr. Res.* **2002**, *337*, 581-585.
- ¹⁶⁹ A. Français, D. Urban, J.-M. Beau, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 8662-8665.
- ¹⁷⁰ S. Xiang, J. Ma, B. K. Gorityala, X.-W. Liu, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 2957-2959.
- ¹⁷¹ M. Iwashita, K. Makide, T. Nonomura, Y. Misumi, Y. Otani, M. Ishida, R. Taguchi, M. Tsujimoto, J. Aoki, H. Arai, T. Ohwada, *J. Med. Chem.* **2009**, *52*, 5837-5863.
- ¹⁷² C. Salomé, E. Salomé-Grosjean, K. D. Park, P. Morieux, R. Swendiman, E. DeMarco, J. P. Stables, H. Kohn, *J. Med. Chem.* **2009**, *53*, 1288-1305.
- ¹⁷³ J. Kalikanda, Z. Li, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 2380-2383.
- ¹⁷⁴ I. A. Smellie, S. Bhakta, E. Sim, A. J. Fairbanks, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, *5*, 2257-2266.
- ¹⁷⁵ P.-M. Åberg, B. Ernst, *Acta Chem. Scand.* **1994**, *48*, 228-233.
- ¹⁷⁶ P. Fügedi, P. Garegg, H. Lönn, T. Norberg, *Glycoconjugate J.* **1987**, *4*, 97-108.
- ¹⁷⁷ S. Yamago, T. Yamada, T. Maruyama, J.-i. Yoshida, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 2145-2148.
- ¹⁷⁸ Pour une revue, voir: J. D. C. Codee, R. E. J. N. Litjens, L. J. van den Bos, H. S. Overkleeft, G. A. van der Marel, *Chem. Soc. Rev.* **2005**, *34*, 769-782.
- ¹⁷⁹ a) W. Pilgrim, P. V. Murphy, *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 6747-6755; b) R. R. Schmidt, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1986**, *25*, 212-235.
- ¹⁸⁰ a) S. K. Chatterjee, P. Nuhn, *Chem. Commun.* **1998**, 1729-1780; b) G. Wei, X. Lv, Y. Du, *Carbohydr. Res.* **2008**, *343*, 3096-3099.
- ¹⁸¹ D. Chaplin, D. H. G. Crout, S. Bornemann, D. W. Hutchinson, R. Khan, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1992**, 235-237.
- ¹⁸² T. Mikeska, M. Nieger, H. Mansikkamäki, J. Daniels, T. Kolter, *Carbohydr. Res.* **2003**, *338*, 2119-2128.
- ¹⁸³ J. Agarwal, R. K. Peddinti, *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 3502-3505.

Bibliographie

- ¹⁸⁴ D. P. G. Emmerson, R. Villard, C. Mugnaini, A. Batsanov, J. A. K. Howard, W. P. Hems, R. P. Tooze, B. G. Davis, *Org. Biomol. Chem.* **2003**, *1*, 3826-3838.
- ¹⁸⁵ H. Myszka, D. Bednarczyk, M. Najder, W. Kaca, *Carbohydr. Res.* **2003**, *338*, 133-141.
- ¹⁸⁶ D. Horton, *D. Org. Synth.* **1966**, *46*, 1.
- ¹⁸⁷ L.-X. Wang, Y. C. Lee, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1996**, 581-591.
- ¹⁸⁸ M. Tajbakhsh, R. Hosseinzadeh, H. Alinezhad, S. Ghahari, A. Heydari, S. Khaksar, *Synthesis* **2011**, 490-496.
- ¹⁸⁹ A. F. Abdel-Magid, K. G. Carson, B. D. Harris, C. A. Maryanoff, R. D. Shah, *J. Org. Chem.* **1996**, *61*, 3849-3862.
- ¹⁹⁰ Y. Kajihara, H. Kodama, T. Endo, H. Hashimoto, *Carbohydr. Res.* **1998**, *306*, 361-378.
- ¹⁹¹ J.-C. Jacquinet, P. Sinaÿ, *Carbohydr. Res.* **1974**, *32*, 101-114.
- ¹⁹² K. R. Reddy, K. Rajgopal, C. U. Maheswari, M. Lakshmi Kantam, *New J. Chem.* **2006**, *30*, 1549-1552.
- ¹⁹³ A. Ricci, L. Bernardi, C. Gioia, S. Vierucci, M. Robitzer, F. Quignard, *Chem. Commun.* **2010**, *46*, 6288-6290.
- ¹⁹⁴ F. Quignard, R. Valentin, F. Di Renzo, *New J. Chem.* **2008**, *32*, 1300-1310.
- ¹⁹⁵ P. Rota, P. Allevi, R. Colombo, M. L. Costa, M. Anastasia, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 1850-1853.
- ¹⁹⁶ A. G. Pearson, M. J. Kiefel, V. Ferro, M. von Itzstein, *Org. Biomol. Chem.* **2011**, *9*, 4614-4625.
- ¹⁹⁷ a) G. Zemplén, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1927**, *60*, 1555-1564; b) K. Ágoston, A. Dobó, J. Rákó, J. Kerékgyártó, Z. Szurmai, *Carbohydr. Res.* **2001**, *330*, 183-190.
- ¹⁹⁸ M. De Nisco, S. Pedatella, S. Bektaş, A. Nucci, R. Caputo, *Carbohydr. Res.* **2012**, *356*, 273-277.
- ¹⁹⁹ H. Zhang, W. Zhao, J. Zou, Y. Liu, R. Li, Y. Cui, *Chirality* **2009**, *21*, 492-496.
- ²⁰⁰ N. Mase, K. Watanabe, H. Yoda, K. Takabe, F. Tanaka, C. F. Barbas, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 4966-4967.
- ²⁰¹ Y. Alvarez-Casao, E. Marques-Lopez, R. P. Herrera, *Symmetry* **2011**, *3*, 220-245.
- ²⁰² F. Zhong, G.-Y. Chen, Y. Lu, *Org. Lett.* **2010**, *13*, 82-85.
- ²⁰³ E. W. Thomas, *Carbohydr. Res.* **1974**, *33*, 175-177.
- ²⁰⁴ K. Matsuoka, Y. Matsuzawa, K. Kusano, D. Terunuma, H. Kuzuhara, *Biomacromolecules* **2000**, *1*, 798-800.
- ²⁰⁵ F. Nanjo, K. Sakai, T. Usui, I. Takai, Y. Ishido, *J. Carbohydr. Chem.* **1988**, *7*, 67-82.
- ²⁰⁶ J. E. Heidlas, W. J. Lees, P. Pale, G. M. Whitesides, *J. Org. Chem.* **1992**, *57*, 146-151.
- ²⁰⁷ K.-H. Chen, W.-F. Fang, Y.-T. Chen, J.-M. Fang, J.-T. Yang, *Chem. Eng. J.* **2012**, *198-199*, 33-37.
- ²⁰⁸ E. Kamst, K. Zegelaar-Jaarsveld, G. A. van der Marel, J. H. van Boom, B. J. J. Lugtenberg, H. P. Spaink, *Carbohydr. Res.* **1999**, *321*, 176-189.
- ²⁰⁹ B. Roy, B. Mukhopadhyay, *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 3783-3787.
- ²¹⁰ J.-i. Kadokawa, T. Nagaoka, J. Ebana, H. Tagaya, K. Chiba, *Carbohydr. Res.* **2000**, *327*, 341-344.
- ²¹¹ B. Weissmann, *J. Org. Chem.* **1970**, *35*, 1690-1691.
- ²¹² S. A. Thadke, S. Hotha, *Tetrahedron Lett.* **2010**, *51*, 5912-5914.
- ²¹³ F. H. Cano, C. Foces-Foces, J. Jimenez-Barbero, M. Martin-Lomas, *Carbohydr. Res.* **1984**, *127*, 338-344.
- ²¹⁴ D. A. Lamprecht, N. O. Muneri, H. Eastwood, K. J. Naidoo, E. Strauss, A. Jardine, *Org. Biomol. Chem.* **2012**, *10*, 5278-5288.
- ²¹⁵ D. W. Gammon, D. J. Steenkamp, V. Mavumengwana, M. J. Marakalala, T. T. Mudzunga, R. Hunter, M. Munyololo, *Biorg. Med. Chem.* **2010**, *18*, 2501-2514.
- ²¹⁶ G. Mugunthan, K. P. R. Kartha, *Tetrahedron Lett.* **2012**, *53*, 5631-5634.

Bibliographie

- ²¹⁷ D. J. Chambers, G. R. Evans, A. J. Fairbanks, *Tetrahedron* **2004**, *60*, 8411-8419.
- ²¹⁸ X. Ge, C. Qian, Y. Chen, X. Chen, *Tetrahedron: Asymmetry* **2014**, *25*, 596-601.
- ²¹⁹ N. Moitessier, C. Henry, N. Aubert, Y. Chapleur, *Tetrahedron Lett.* **2005**, *46*, 6191-6194.
- ²²⁰ J. M. Vega-Pérez, J. L. Espartero, F. J. Ruiz, F. Alcudia, *Carbohydr. Res.* **1992**, *232*, 235-247.
- ²²¹ D. P. G. Emmerson, W. P. Hems, B. G. Davis, *Tetrahedron: Asymmetry* **2005**, *16*, 213-221.
- ²²² E. J. Grayson, B. G. Davis, *Org. Lett.* **2005**, *7*, 2361-2364.
- ²²³ A. G. Sánchez, A. C. Ventulá, U. Scheidegger, *Carbohydr. Res.* **1971**, *18*, 173-183.
- ²²⁴ P. Boullanger, M. Jouineau, B. Bouammali, D. Lafont, G. Descotes, *Carbohydr. Res.* **1990**, *202*, 151-164.
- ²²⁵ a) M. Kiso, L. Anderson, *Carbohydr. Res.* **1985**, *136*, 309-323; b) F. Dasgupta, L. Anderson, *Carbohydr. Res.* **1990**, *202*, 239-255.
- ²²⁶ E. M. S. Pérez, M. Ávalos, R. Babiano, P. Cintas, M. E. Light, J. L. Jiménez, J. C. Palacios, A. Sancho, *Carbohydr. Res.* **2010**, *345*, 23-32.
- ²²⁷ Y. Cai, C.-C. Ling, D. R. Bundle, *Carbohydr. Res.* **2009**, *344*, 2120-2126.
- ²²⁸ G. E. Whitworth, M. S. Macauley, K. A. Stubbs, R. J. Dennis, E. J. Taylor, G. J. Davies, I. R. Greig, D. J. Vocadlo, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *129*, 635-644.
- ²²⁹ J. Vega-Pérez, J. Espartero, M. Vega, J. Candela, F. Ingesias-Guerra, F. Alcudia, *Eur. J. Mass Spectrom.* **1995**, *1*, 161-169.
- ²³⁰ C. Henry, J.-P. Joly, Y. Chapleur, *J. Carbohydr. Chem.* **1999**, *18*, 689-695.
- ²³¹ S. Takahashi, H. Terayama, H. Koshino, H. Kuzuhara, *Tetrahedron* **1999**, *55*, 14871-14884.
- ²³² D. J. Silva, H. Wang, N. M. Allanson, R. K. Jain, M. J. Sofia, *J. Org. Chem.* **1999**, *64*, 5926-5929.
- ²³³ A. D'Almeida, M. Ionata, V. Tran, C. Tellier, M. Dion, C. Rabiller, *Tetrahedron: Asymmetry* **2009**, *20*, 1243-1246.
- ²³⁴ G. Despras, D. Urban, B. Vauzeilles, J.-M. Beau, *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 1067-1069.
- ²³⁵ N. Z. Abdelwahab, M. D. Urbaniak, M. A. J. Ferguson, A. T. Crossman, *Carbohydr. Res.* **2011**, *346*, 708-714.
- ²³⁶ J. Lüning, U. Möller, D. Müller, P. Welzel, A. Markus, Y. van Heijenoort, J. van Heijenoort, *Tetrahedron* **1993**, *49*, 10587-10596.
- ²³⁷ B. Yu, Q. Ouyang, C. Li, Y. Hui, *J. Carbohydr. Chem.* **1996**, *15*, 297-302.
- ²³⁸ P. Gatellier, J. P. Grivet, F. Delmotte, *Biochim. Biophys. Acta, Protein Struct. Mol. Enzymol.* **1987**, *916*, 428-436.
- ²³⁹ K. Glegoła, E. Framery, C. Goux-Henry, K. Michał Pietrusiewicz, D. Sinou, *Tetrahedron* **2007**, *63*, 7133-7141.
- ²⁴⁰ H. Lin, C. T. Walsh, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 13998-14003.
- ²⁴¹ F. P. Boulineau, A. Wei, *Carbohydr. Res.* **2001**, *334*, 271-279.
- ²⁴² X. Hu, W. Zhang, I. Carmichael, A. S. Serianni, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 4641-4652.
- ²⁴³ J. Agarwal, R. K. Peddinti, *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, *2012*, 6390-6406.
- ²⁴⁴ B.-L. Zheng, Q.-Z. Liu, C.-S. Guo, X.-L. Wang, L. He, *Org. Biomol. Chem.* **2007**, *5*, 2913-2915.
- ²⁴⁵ X.-W. Liu, T. N. Le, Y. Lu, Y. Xiao, J. Ma, X. Li, *Org. Biomol. Chem.* **2008**, *6*, 3997-4003.
- ²⁴⁶ Y. Wu, Y. Zhang, M. Yu, G. Zhao, S. Wang, *Org. Lett.* **2006**, *8*, 4417-4420.
- ²⁴⁷ T. Kanemitsu, A. Umehara, M. Miyazaki, K. Nagata, T. Itoh, *Eur. J. Org. Chem.* **2011**, *2011*, 993-997.
- ²⁴⁸ S. Singh Chimni, S. Singh, D. Mahajan, *Tetrahedron: Asymmetry* **2008**, *19*, 2276-2284.
- ²⁴⁹ C.-S. Da, L.-P. Che, Q.-P. Guo, F.-C. Wu, M. Xiao, Y.-N. Jia, *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 2541-2546.
- ²⁵⁰ M. N. Elinson, A. I. Ilovawasky, V. M. Merkulova, F. Barba, B. Batanero, *Tetrahedron* **2008**, *64*, 5915-5919.

Résumé/Abstract

Catalyse organique énantiosélective par des oligomères de taille bien définie de chitosane

Des oligomères de taille définie de chitosane ont été préparés et testés en tant qu'organocatalyseurs dans des réactions d'aldolisation énantiosélectives. Les précurseurs de ces catalyseurs sont obtenus en une seule étape par une réaction d'acétolyse contrôlée de la chitine, second polysaccharide le plus abondant. Une méthodologie reposant sur des réactions de glycosylation sous activation micro-ondes a été développée afin de fonctionnaliser la position anomérique de ces oligomères. Ainsi, le triflate de cuivre(II), utilisé en quantité catalytique, s'est révélé être le promoteur le plus efficace pour l'activation de la glucosamine ou du chitobiose peracétylés de configuration α . La sélectivité α des produits glycosylés résultent d'une isomérisation *in situ* des produits cinétiques β . Des organocatalyseurs se différenciant par leur partie aglycone et par leur degré de substitution ont été synthétisés en peu d'étapes. Les résultats les plus intéressants ont été obtenus avec un dérivé du chitobiose soluble en milieu aqueux. Nous avons montré, qu'en présence d'un co-catalyseur acide, l'acide 4-nitrobenzoïque, la réaction entre la cyclohexanone et le 4-nitrobenzaldéhyde, conduit à l'adduit *anti* avec un bon excès énantiomérique (89% *ee*). De plus, nous avons également montré que ce catalyseur pouvait être réutilisé dans plusieurs cycles catalytiques sans perte de sélectivité.

Mots clés : Catalyse énantiosélective, aldolisation, chitine, micro-ondes, glycosylation, oligomères, glucosamine.

Enantioselective organocatalysis with size-defined chitosan oligomers

The catalytic behaviour of size-defined chitosan oligomers has been evaluated for asymmetric aldol reactions. These oligomers were obtained from chitin, which is one of the most abundant naturally occurring polymers, as a renewable starting biomolecule. Thus, controlled depolymerization of chitin was carried out by acetolysis providing per-*O*-acetylated *N*-acetyl- α -D-glucosamine oligomers with a polymerization degree from 2 to 4. To investigate the influence of the aglycon moiety, we developed a Lewis acid-promoted glycosylation reactions under microwave irradiation. Thus, a catalytic amount of copper(II) triflate proved to be the most effective promoter for the activation of α -per-*O*-acetylated glucosamine oligomers, which are considered as poorly reactive substrates, to selectively obtain α -glycosylated compounds. This selectivity results from *in situ* isomerization of kinetic β products. Chitosan-based catalysts, which differ in the distribution pattern, were synthesized in a few steps. The most promising results were obtained with a chitobiose derivative, which efficiently catalyzed the aldol reaction between cyclohexanone and 4-nitrobenzaldehyde, in the presence of 4-nitrobenzoic acid as a co-catalyst, in water, providing the *anti*-adduct in high yield with good enantioselectivity (89% *ee*). In addition, this homogeneous organocatalyst can be reused in several cycles without loss of catalytic activity.

Keywords: Enantioselective catalysis, aldolisation, chitin, microwave, glycosylation, oligomers, glucosamine.