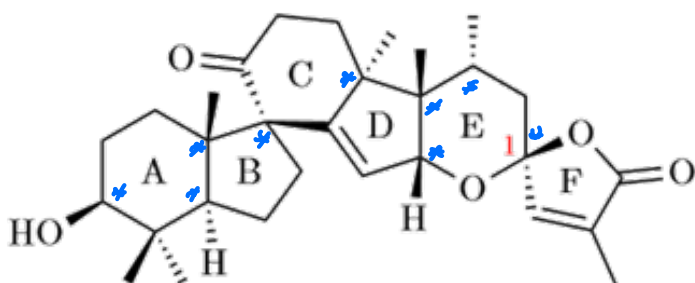




DS6 – Chimie organique + Complexes
+ Cycles catalytiques

1 - Synthèse totale asymétrique de la (-)-epirochenoside A (Ch.B 2024)

①

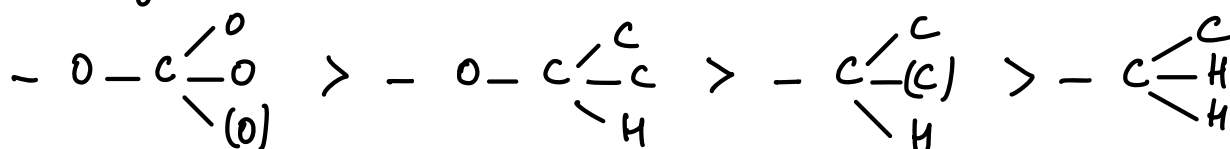


- x 9 C* et 2 C=C diastériquement substitués.
- x absence d'élément de symétrie.
- x les doubles liaisons intracycliques ne peuvent adopter 2 configurations

$2^9 = 512$ stéréoisomères de configurations possibles

la synthèse doit permettre de ne pas former les 511 autres.

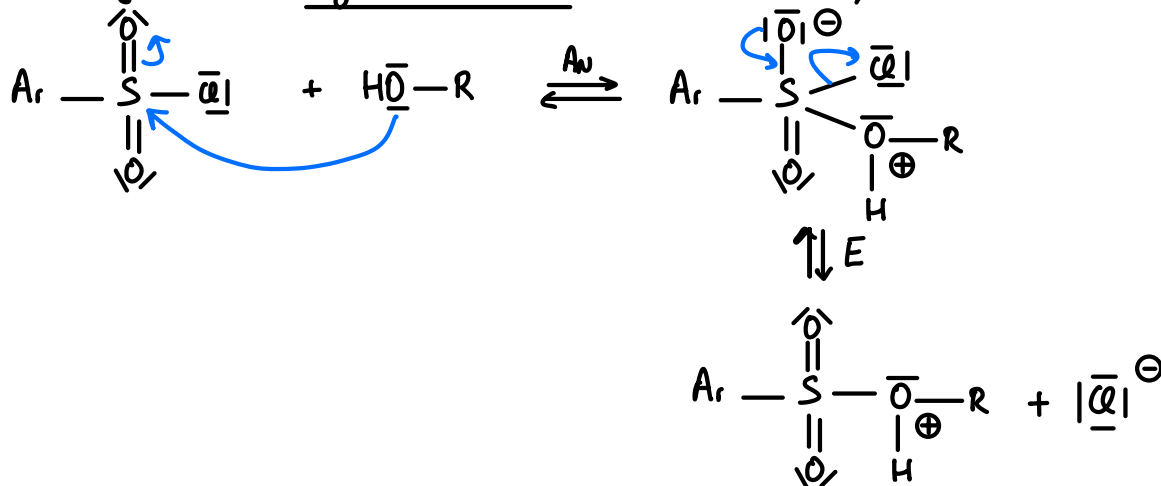
② D'après les règles de Cahn, Ingold et Prelog,

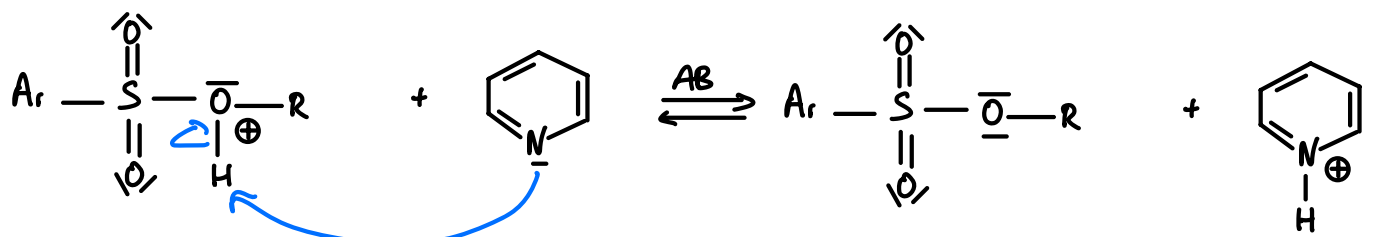


stéréodescripteur : S

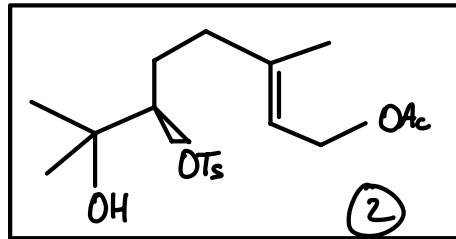
③ L'alcool secondaire est plus accessible $\rightarrow$ régiosélectivité.

Par analogie avec acylation d'alcool ($A_N + E + A_B$)

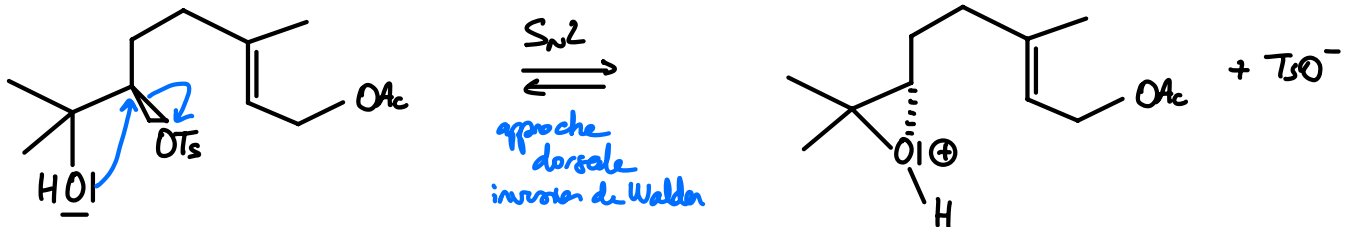




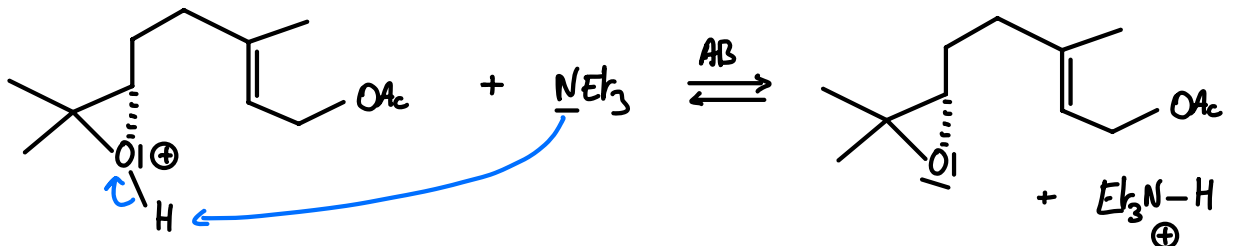
Structure de l'espèce 2



- ④ $\text{pK}_a(\text{Et}_3\text{NH}^+/\text{Et}_3\text{N}) \sim 10$
 Et_3N base trop faible pour déprotoner quantitativement l'alcool ($\text{pK}_a(\text{alcool}/\text{alcodolate}) \sim 16-18$) : le mécanisme le + probable ne doit vraisemblablement pas démarer par une déprotonation.

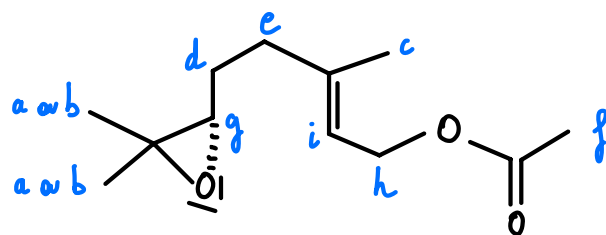


Puis, étape acide-base



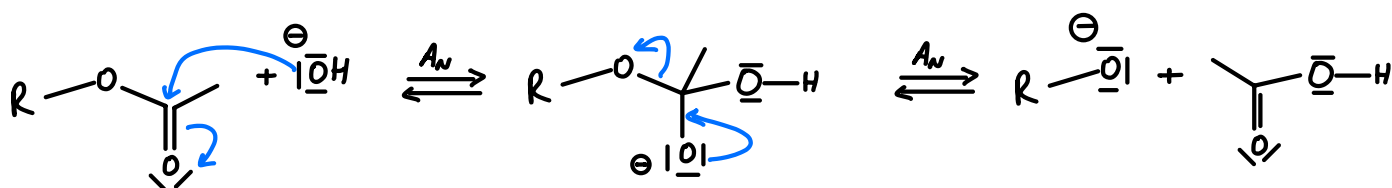
⑤

	$\delta(\text{ppm})$	Intégrat	Multiplicité	$J(\text{Hz})$	Couplage avec
a	1,34	3H	s	—	—
b	1,44	3H	s	—	—
c	1,69	3H	s	—	—
d	1,81	2H	td	7,5 et 5,4 Hz	2H _e et 1H _g
e	2,00	2H	t	7,5 Hz	2H _d
f	2,05	3H	s	—	—
g	2,81	1H	t	5,4 Hz	2H _d
h	4,61	2H	d	6,6 Hz	1H _i
i	5,29	1H	t	6,6 Hz	2H _h

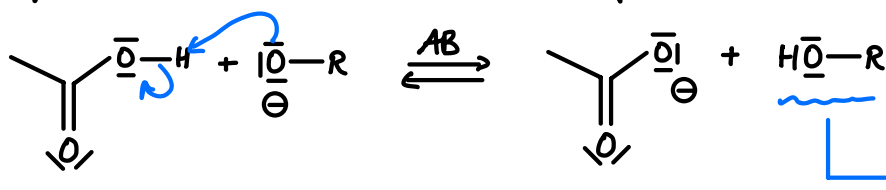


Les deux groupements méthyles sont diastéréotopiques et par conséquent non synchrones. Ceci se lie à l'existence d'un centre asymétrique proche et localisé, à l'impossibilité de changement de conformation au niveau du cycle. Les 2 groupements ne sont donc pas du même environnement.

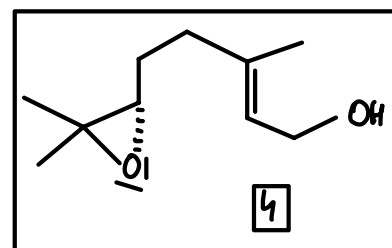
⑥ Il s'agit d'une hydrolyse d'ester en conditions basiques ($A_N + E + A_B$).



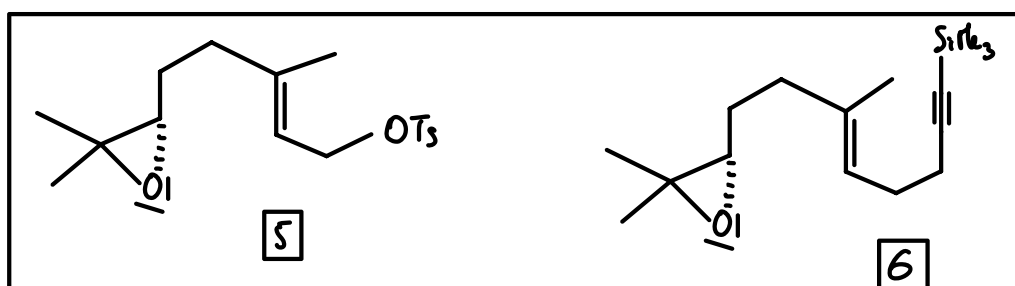
Étape acide-base (via le solvant a priori)



⚠ En milieu basique, le produit est le carboxylate.
Mais ici, le retour en milieu acide est mentionné



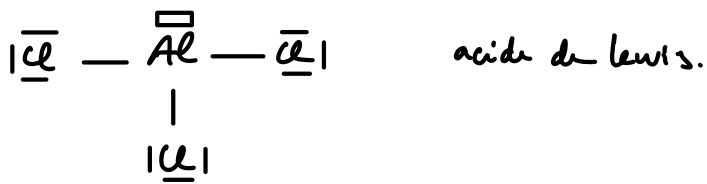
⑦ Tosylation d'alcool puis substitution au niveau de l'ester sulfonique.



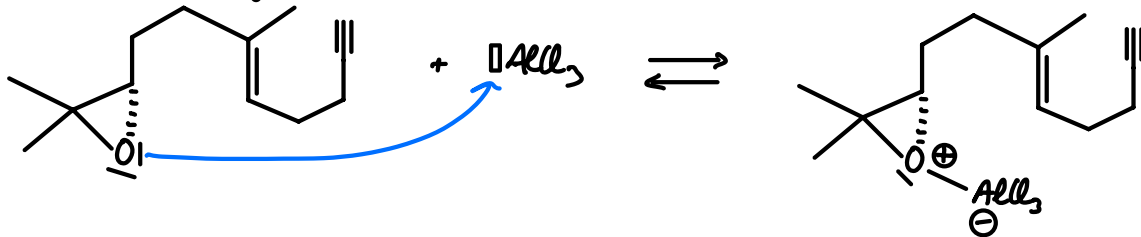
On peut imaginer que le magnésien aurait pu agir également sur l'époxide.
Le lithium est peut-être plus chimiosélectif.

⑧ D'après le Doc 1, le retrait du groupe triméthylsilyl est mené par action du carbonate de potassium de la méthane.

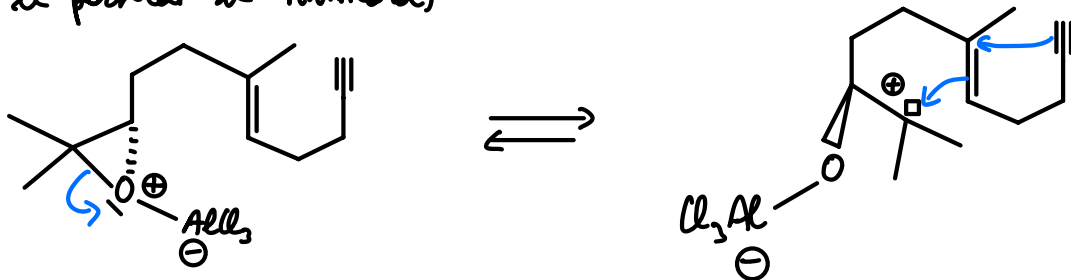
③ AlCl_3 : $\text{N}^\circ \text{v} = 3 + 3 \times 7 = 24 \rightarrow 12 \text{ doublets}$



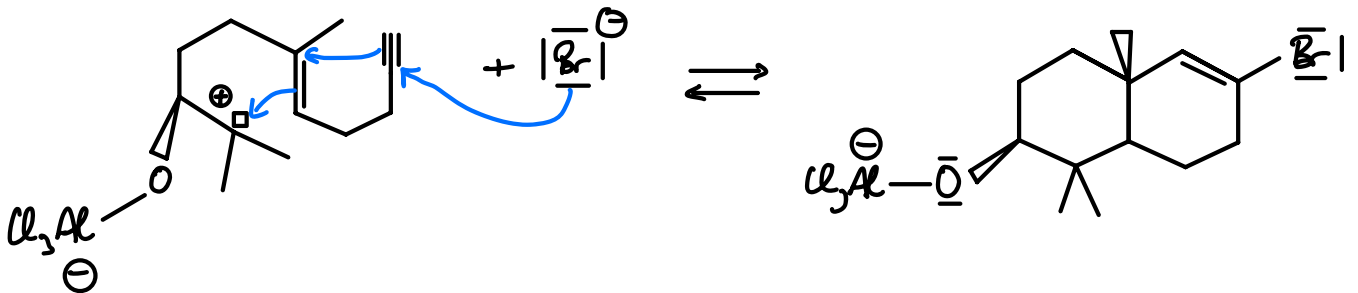
④ L'acide de Lewis peut être envisagé comme un analogue de l'ion H^+ .
Il complexe l'oxygène de l'époxyde pour en faire l'électrophile.



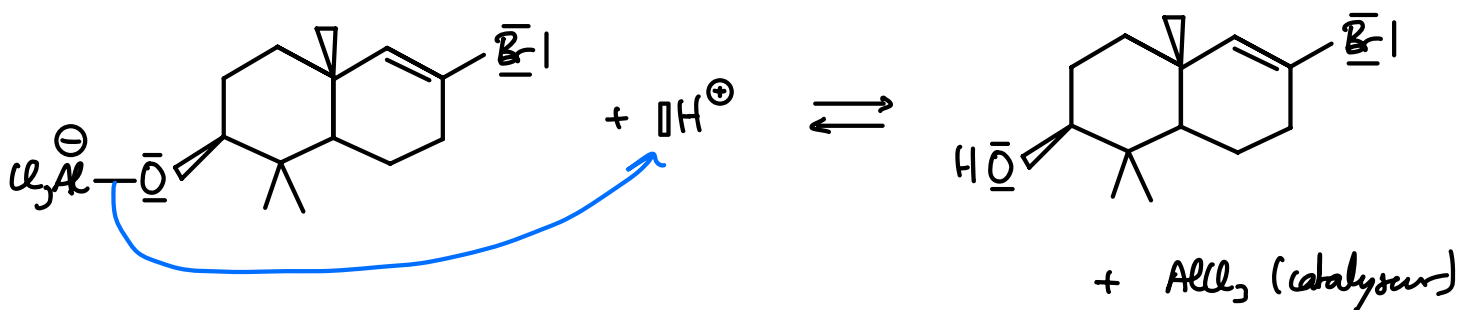
Formation du carbocation tertiaire moins instable (barrière d'activation moindre d'ap. le postulat de Hammond)



L'ion bromure agit comme nucléophile sur l'alcène d'ap. la forme de 8.
Il s'ensuit une formation de 2 cycles de manière concertée par respect du nombre total d'étaps indiqué par l'énoncé.



Étape acide-base (substitution du ligand sur l'aluminium).

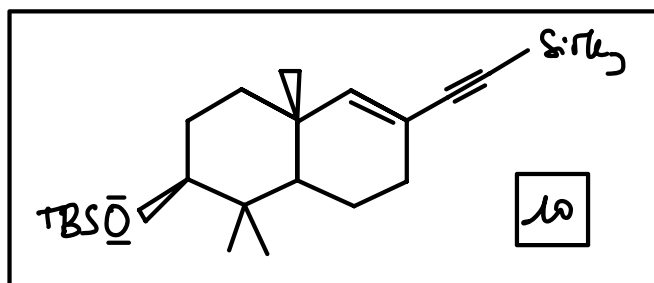


⑪ 8 → 9 est une substitution (ou un couplage mais H-P)

$\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2$ est un catalyseur

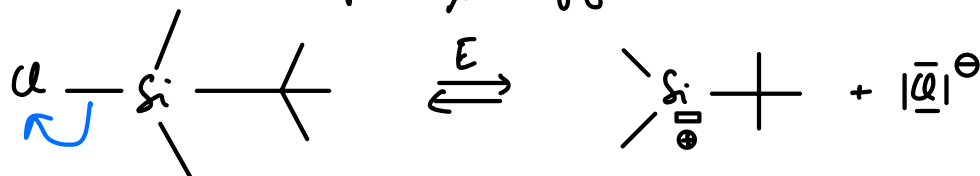
PPh_3 est 1 ligand neutre
 Cl^- est anionique } → neutralité globale ⇒ $\text{NO}(\text{Pd}) = +\text{II}$

⑫ Il s'agit de la formation d'un éther silylé.

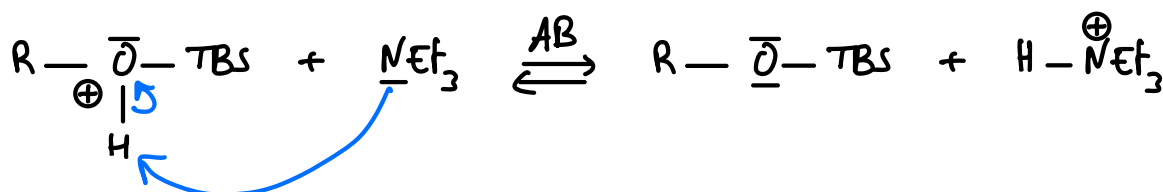
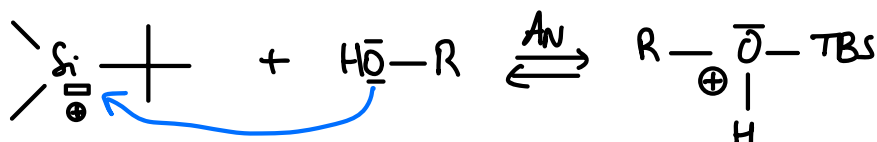


l'énocé attendu 1 analogue avec la réactivité de $\text{Cl}-\text{C}(\text{CH}_3)_3$

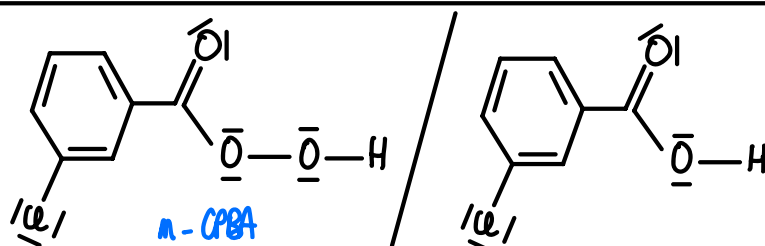
l'halogénoalcane tertiaire devrait réagir avec l'alcool selon 1 mécanisme de substitution nucléophile monomoléculaire car le carbocation associé est stabilisé par hyperconjugaison.



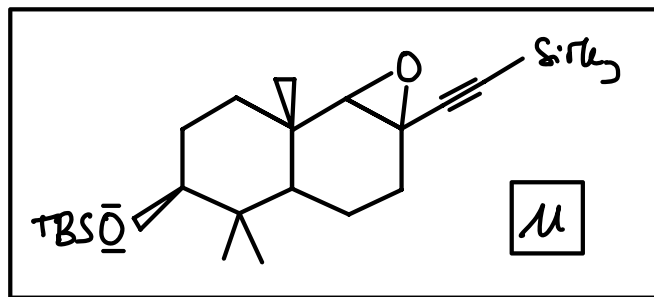
Addition de l'alcool puis déprotonation (à nouveau, la base n'est pas assez forte pour déprotoner l'alcool avant son addition sur le carbocation)



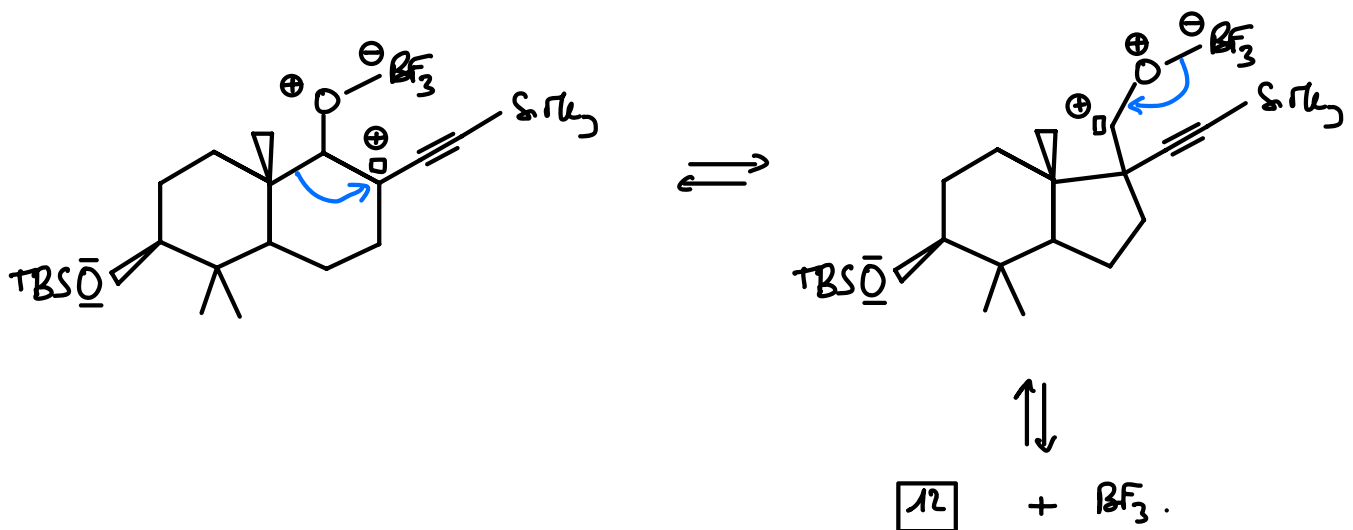
⑬ Couple oxydant / réducteur



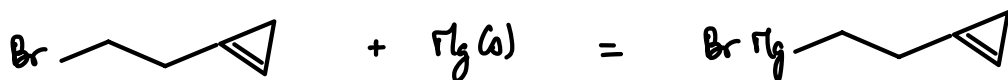
Il se produit une époxydation.



(14) la modification de la chaîne carbonée fait penser à une transposition (réarrangement du carbocation). Le trifluorure de bore, acide de Lewis, complexe l'époxide qui induit vers le carbocation. (cf (13)).



(15) Préparation du magnésien:



Solvant : complexant (base de Lewis) + aprotique + non électrophile + peu polaire
→ Et₂O ou THF p. expl.

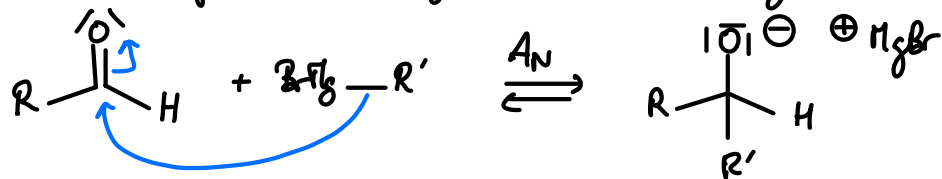
Filiter anhydre car magnésien base forte. (sererie sèche + garde à l'air).

Atmosphère inerte (éviter action de O₂ et CO₂)

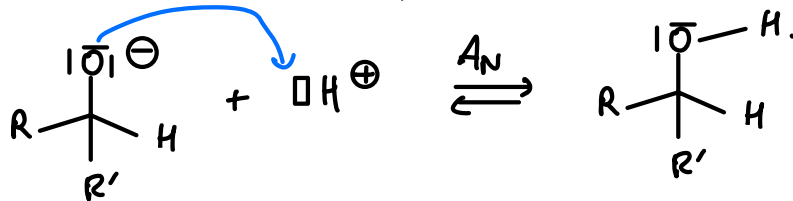
Halogénocalcane en sol^o de l'éther introduit plutôt à partir d'1 Mg en excès
→ maîtrise de l'exothermicité
→ limitation R^o de Würtz

Bain eau + place à proximité

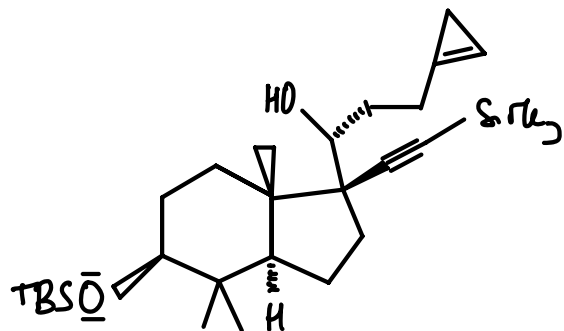
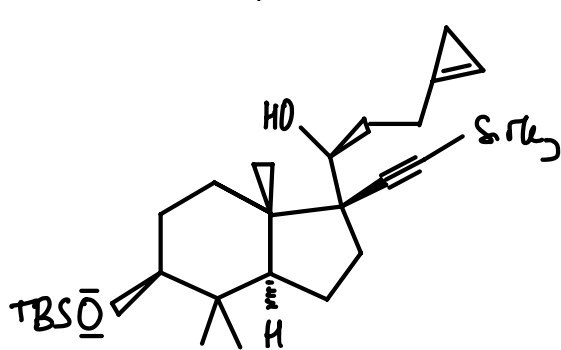
①⑥ Addition nucléophile du magnésien sur l'aldéhyde.



Protonation lors de l'hydrolyse acide finale



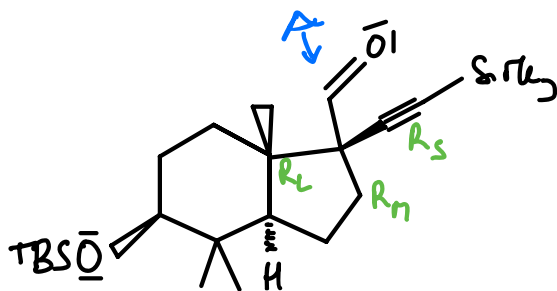
Stereoisomères formés:



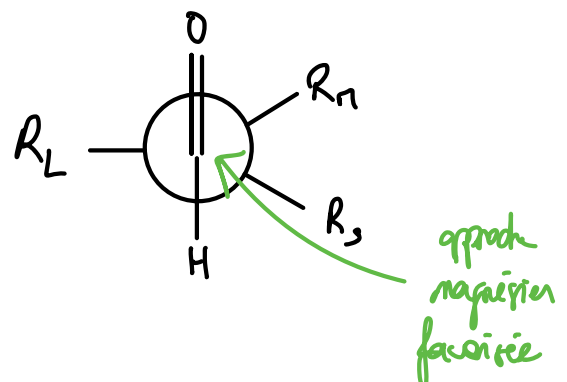
diastéréoisomères.

①⑦ l'approche est favorisée pour des raisons stériques :
l'approche de laquelle le nucléophile est opposé au groupement le moins volumineux est privilégiée.

①⑧ Structure de 12:

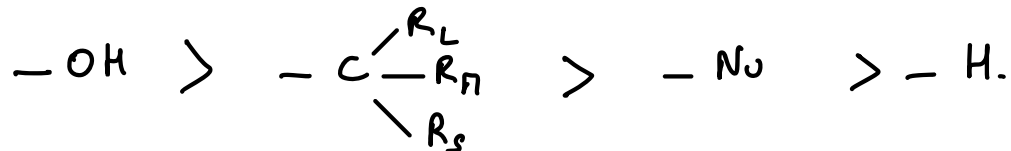


Représentation de Newman (en respectant la configuration du centre stéréogène).



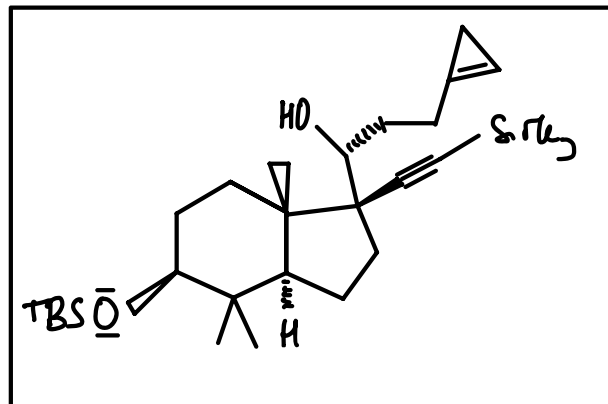


Le stériodscripteur du nouveau centre stéréogène de la stéroisomère majoritaire peut alors être déterminé.



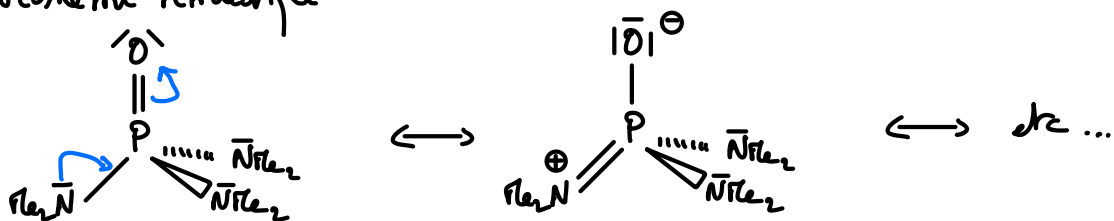
→ stériodscripteur R.

stéroisomère majoritaire:



- (19) Il reste à prolonger l'alcod et à déprotéger l'alcyne vrai.
 A priori, au vu des données du document 1, l'ordre n'importe pas.
 x TESCl, Base faible
 x K_2CO_3 , $MeOH$.

(20) Géométrie tétraédrique



La zone "apexée" constitue 1 pôle positif dans lequel la charge positive se partage entre les 3 atomes d'azote. À l'opposé, l'atome d'oxygène assure le pôle négatif. HTPA & polaire

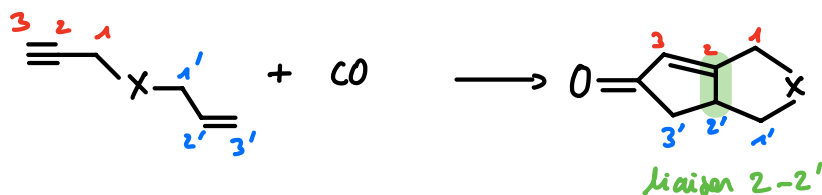
En complément, HMPA est un solvant efficace pour solvater le cations (pôle négatif peu encombré) mais peu efficace pour solvater les anions (pôle positif encombré).

Couplé à son caractère dissociant, il est parfois utilisé pour améliorer la réactivité des nucléophiles anioniques en solvataant efficacement le contre-cation.

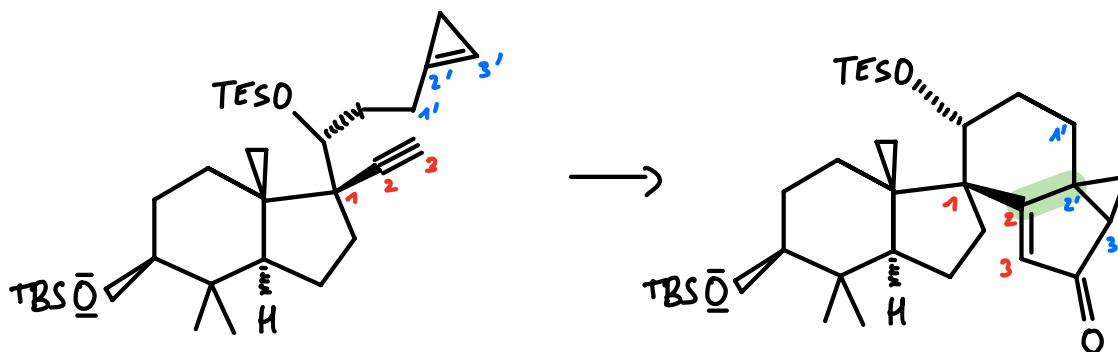
(21)

- 1 échange de ligand
- 2 échange de ligand
- 4 insertion - migration (1,1)
- 5 complexation
- 6 élimination réductrice
- 7 échange de ligand.

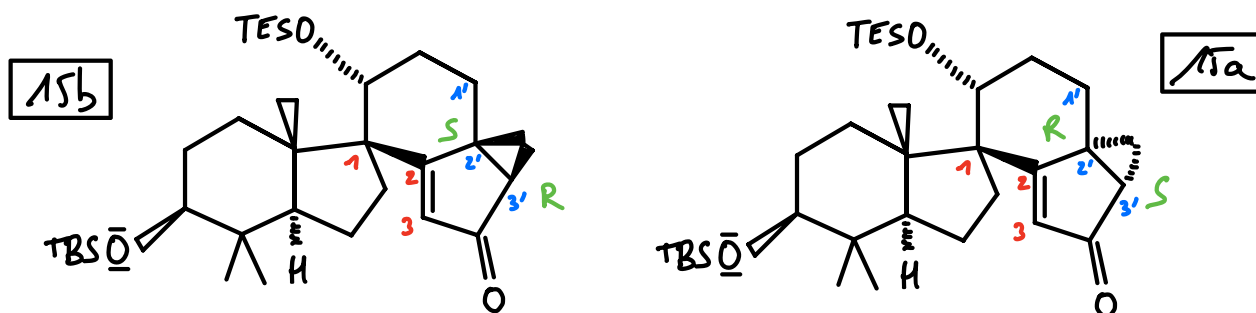
(22) D'après le doc 4, l'équation de la réaction de Pauson-Khand est :



En transposant cela au réactif 14 qui présente une triple liaison et une double liaison, la réaction intra-moléculaire conduit à :



15a et 15b diffèrent par la stéréochimie d'approche de l'alcyne par rapport au plan du cyclopropène



- (23) On peut proposer 2 arguments à 1 travail sans atmosphère de CO (réactif)
- x 1 effet thermodynamique pr favoriser le sens direct d'évolution.
 - x 1 effet cinétique.

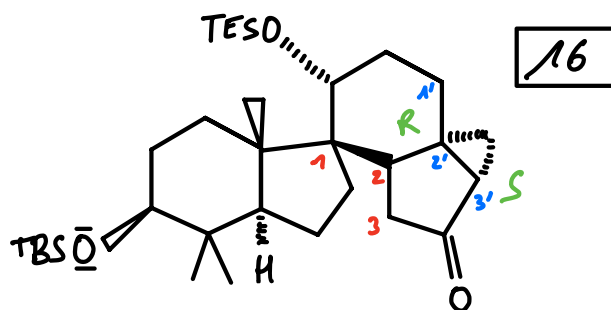
- (24) Il faut regarder + loin ds le problème pr déterminer quel doit être le stéréoisomère majoritaire.
- D'après [17], l'ouverture du cycle par l'ion hydron (méca S_N2 sur 3') doit conduire majoritairement à 1 groupe méthyle vers l'avant (sur 2').

Il faut former une quantité maximale de 15a.

	Taux de 15a ds le mix de produit	Rendement global	Rendement en 15a
W	1/2	61%	30,5%
Ni	1/5	24%	16,8%
Pb	1/3	70%	23,3%

le meilleur catalyseur est le catalyseur à base de tungstène (W).

- (25) Hydrogénation de la double liaison C=C



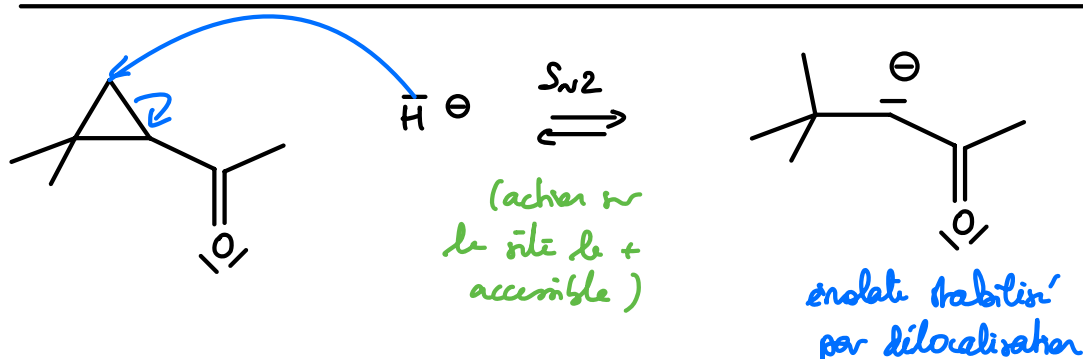
D'après la structure de [17], les atomes d'hydrogène sont additionnés par la face avant (syn-addition).

Cela pourrait correspondre à 1 encombrement supérieur de la face arrière (ce qui n'est pas facile à voir sur les schémas proposés).

(26) Selon le modèle VSEPR, les 3 atomes de carbone du cycle cyclopropane sont censés avoir 1 géométrie optimale tétraédrique.

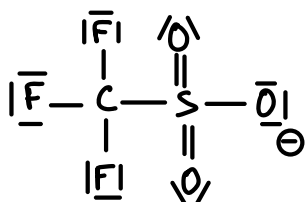
La structure de "petit cycle" entraîne une tension du cycle qui est à l'origine de la réactivité particulière du cyclopropane.

(27)



Il ne reste plus qu'une étape AB.

(28)



la charge négative est

- 1) délocalisée sur les 3 atomes d'oxygène
- 2) partiellement diluée vers la zone CF_3 en raison des effets électroattracteurs cumulés des 3 atomes de fluor.

Pour le caractère nucléophile, le sujet attend sans doute comme réponse que les meilleurs nucléophiles sont les bases les + faibles, mais c'est un moyen mnémotechnique (et non un argument). Il existe des contm - exmples...

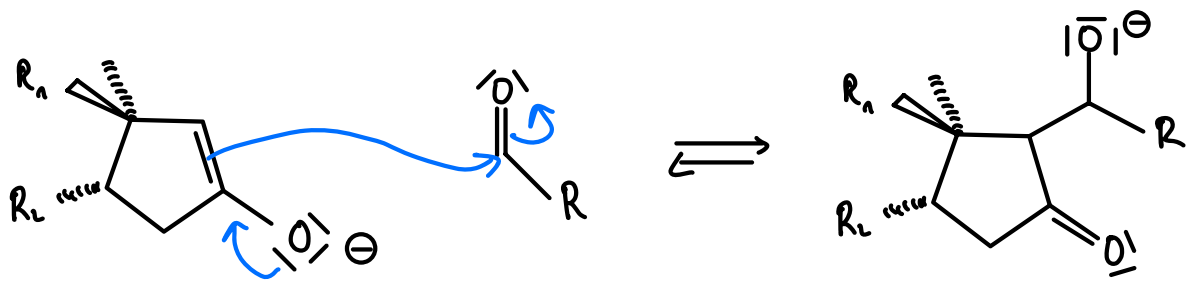
$\text{N}(\text{Pr})_2\text{Et}$ est une base faible et examborie (donc peu nucléophile) elle permet la formation de l'énolate.

(29)

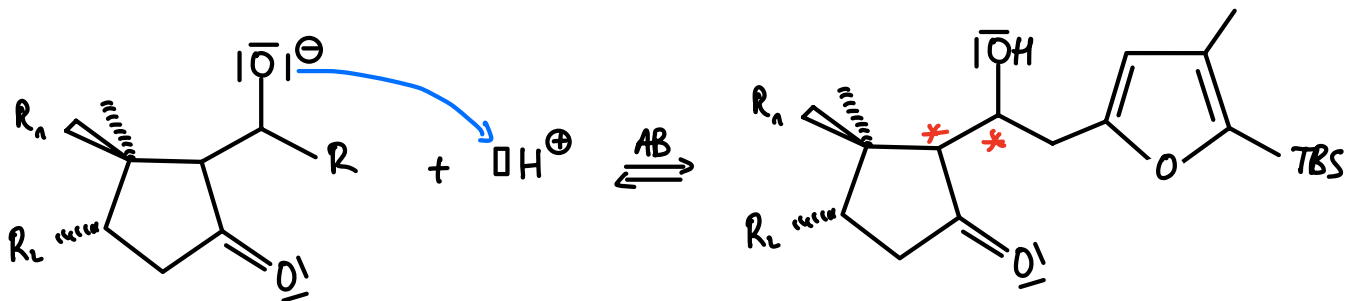
Alcalisation croisée dirigée entre un énolate (de bore) et un aldéhyde

2 atomes de carbone stéréogènes sont formés à partir de 2 réactifs localement plans.

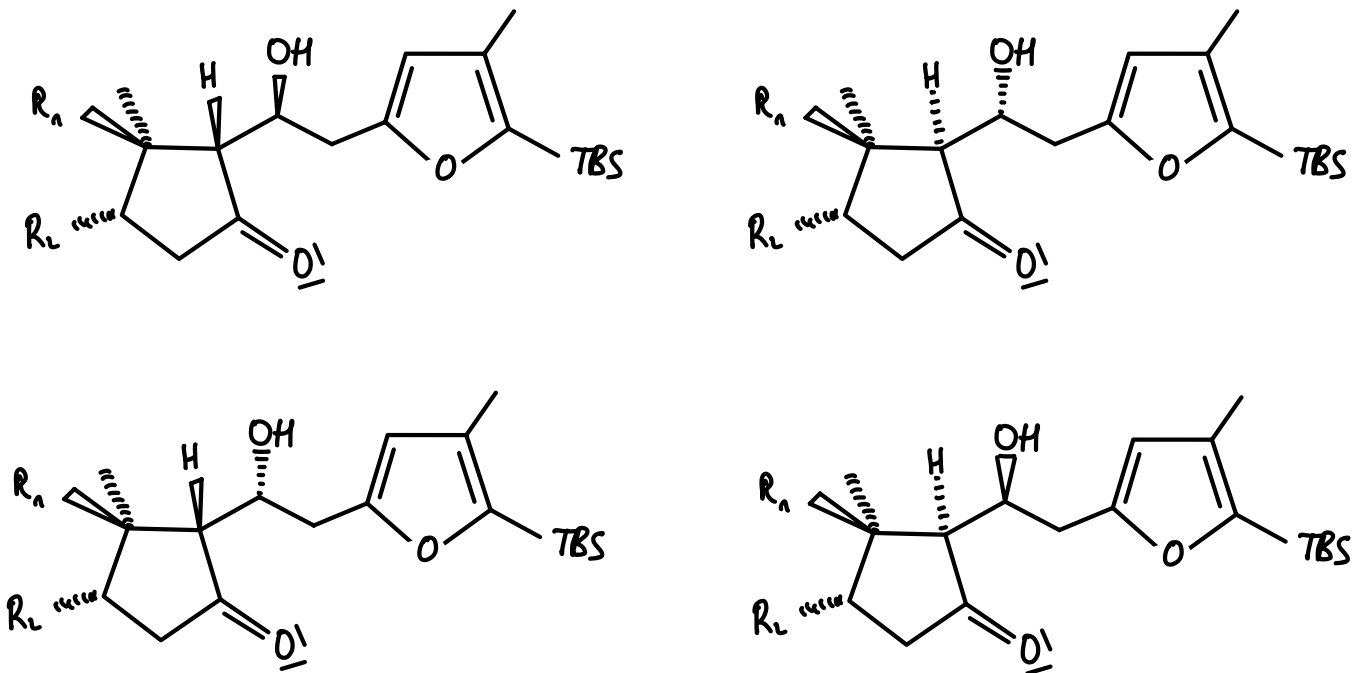
→ 4 stéréoisomères sont attendus.



Puis, protonation



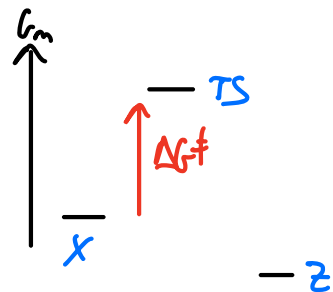
4 stéréoisomères formés. (pas diastéréoisomères entre eux).

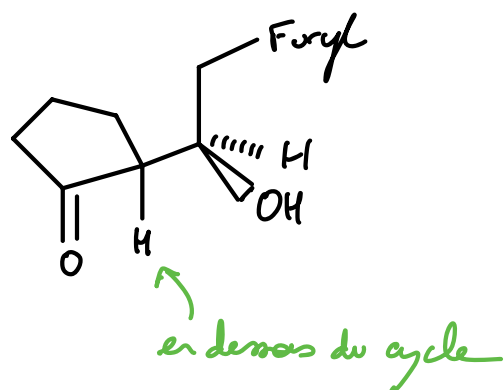
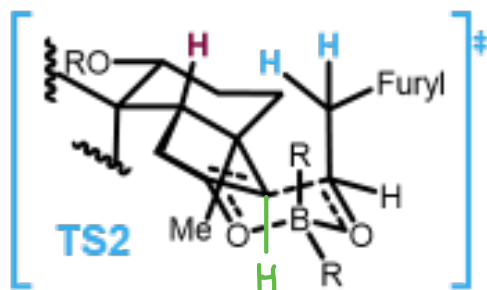


③ On peut imaginer que l'ordonnée de la figure 8 est une enthalpie libre molaire. Si c'est le cas, l'écart d'énergie entre le complexe activé et le réactif correspond à l'enthalpie libre d'activation, paramètre essentiel dans le modèle d'Eyring.

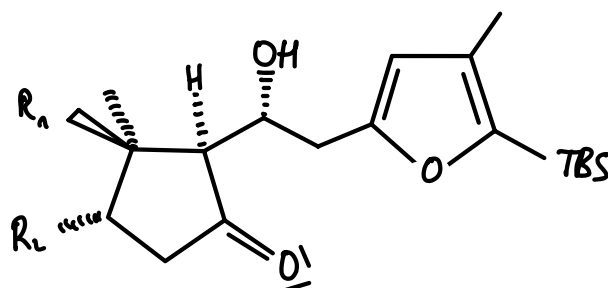
$$k(T) = \frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right)$$

$\Delta G^\ddagger$ minimal pour le chemin 2

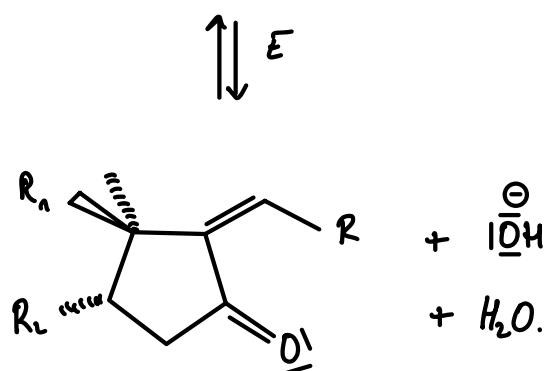
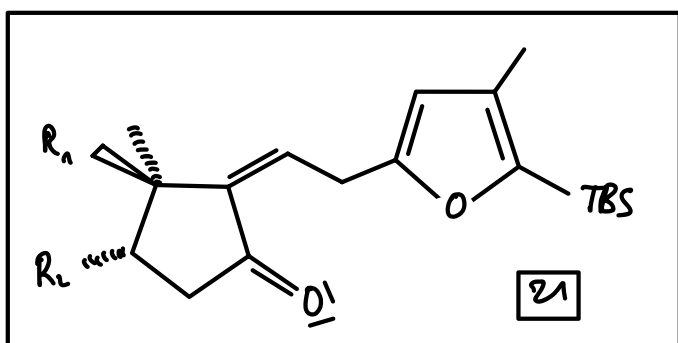
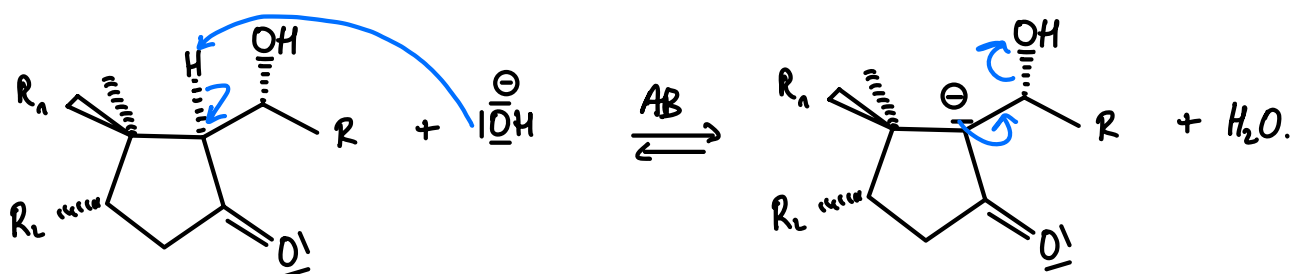




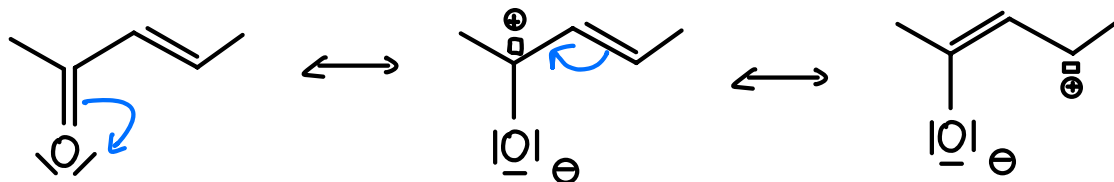
ce qui correspond à ce stéréoisomère:



31) Il se produit 1 crotonisation après l'aldolisation.
Le mécanisme se fait Excb en milieu basique.



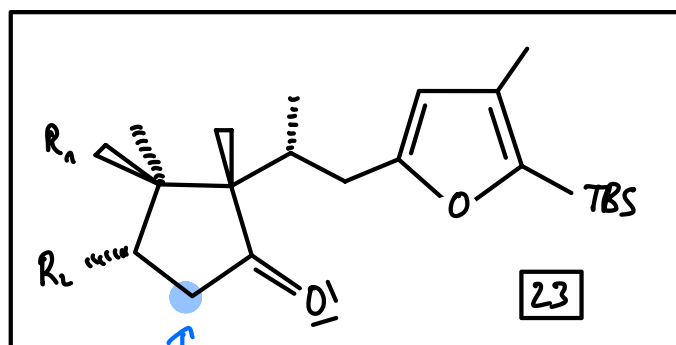
32)



D'après la formule de 22, il se produit une addition 1,4.

(33) Il y a alkylation en α d'une cétone.

Avec des pK_a du couple de la base (éthanolate) et du couple de l'acide (carbonylé), la déprotonation est peu favorable.
Même si l'énolate cinétique se forme en premier, un équilibre acide-base s'établit (durée de transformation longue) pour que l'énolate thermodynamique prédomine.



↑ site qui aurait été préférentiellement déprotoné en cas de contrôle cinétique.

(34) la spectrométrie de RMN 1H serait adaptée car les atomes d'hydrogène portés par la double liaison $C=C$ formée donneraient 1 signal caractéristique dans la zone 5-6 ppm

1) vérifier avant que les groupements R_1 et R_2 ne contiennent pas de double liaison $C=C$

Le cycle "furane" est aromatique : les atomes d'hydrogène qu'il porte ont 1 déplacement chimique plus haut, vers 7-8 ppm.

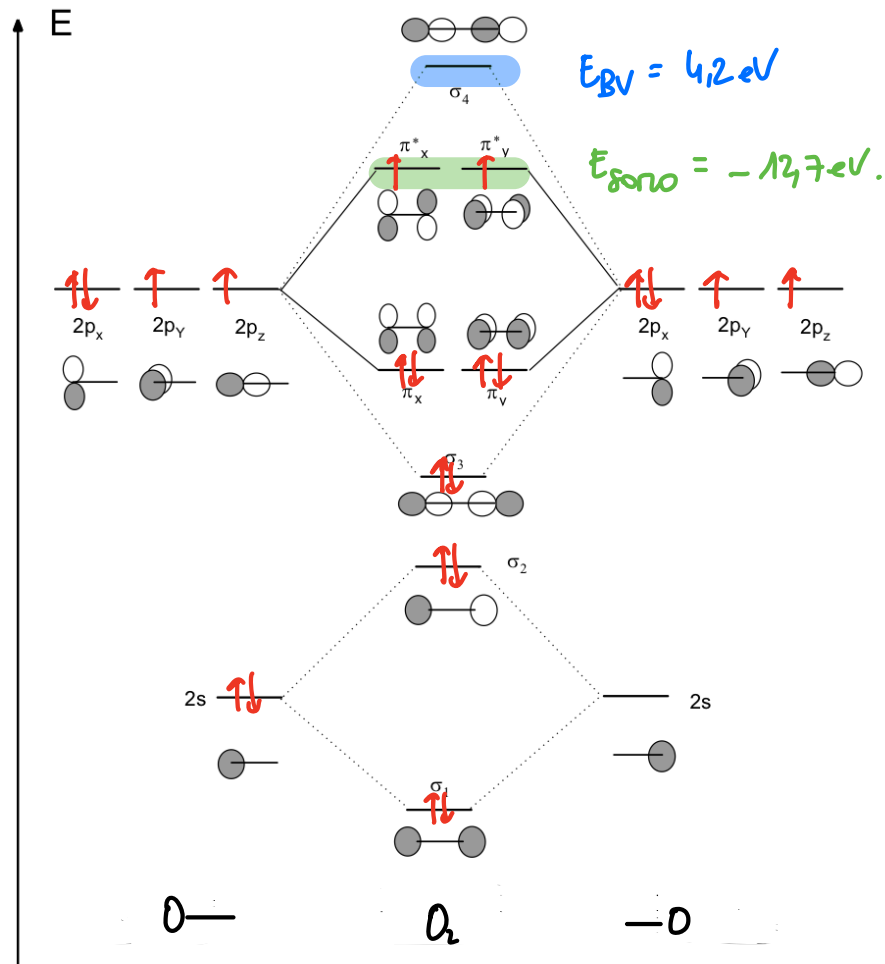
(35) $NaBH_4$ (cf doc 2) permet la réduction de la cétone
Il agit par transfert d'ion hydru

Celle joue 1 rôle d'activateur électrophile du carbonylé
(acide de Lewis $\rightarrow$ analogue à l'ion H^+ utilisé dans les mécanismes)

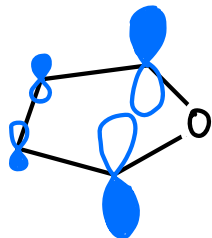
(36) la transformation 25 $\rightarrow$ 26 s'apparente à une réaction de Diels-Alder
- cycle furanique : diène
- dioxygène : diérophile.

37) Ecart d'énergie 2s/2p suffisant p combiner simplement le diagramme d'AO en se contentant d'interactions à 2OA (diag. non-corrélé).

En utilisant 1 critère de symétrie p choisir les AO à combiner, il vient:



38) HO du furane

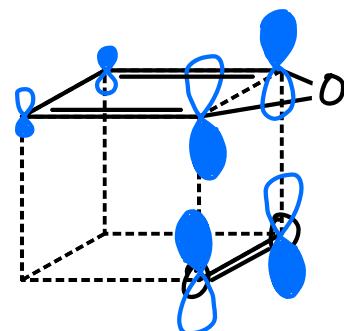
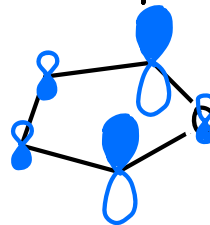


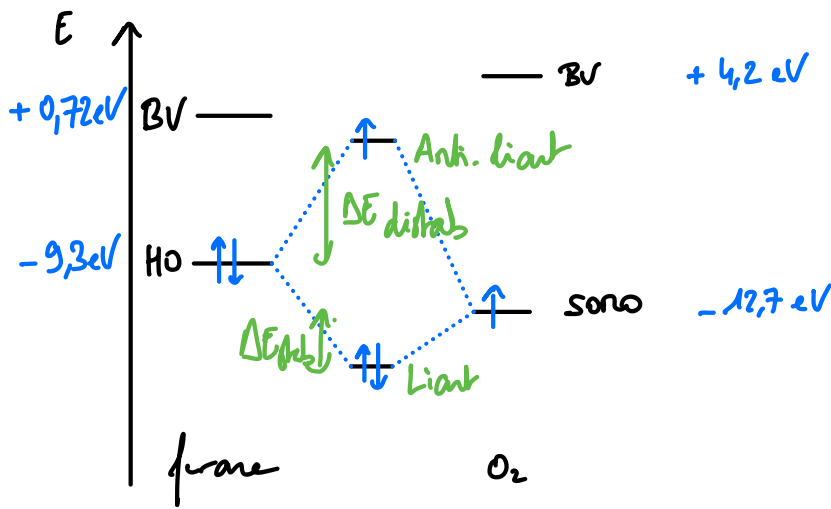
interaction possible avec un π^*

Représentation de l'interaction

HO furane $\rightarrow 2e^-$
 somme (O_2) $\rightarrow 1e^-$

BV du furane





La stabilisation de l'adduit n'est pas évidente car si 2 e⁻ peuplent un niveau d'énergie + bas, un autre électron peuple un niveau d'énergie supérieur (anti-liant)

Stabilisation globale si $E_{\text{finale}} < E_{\text{init}}$

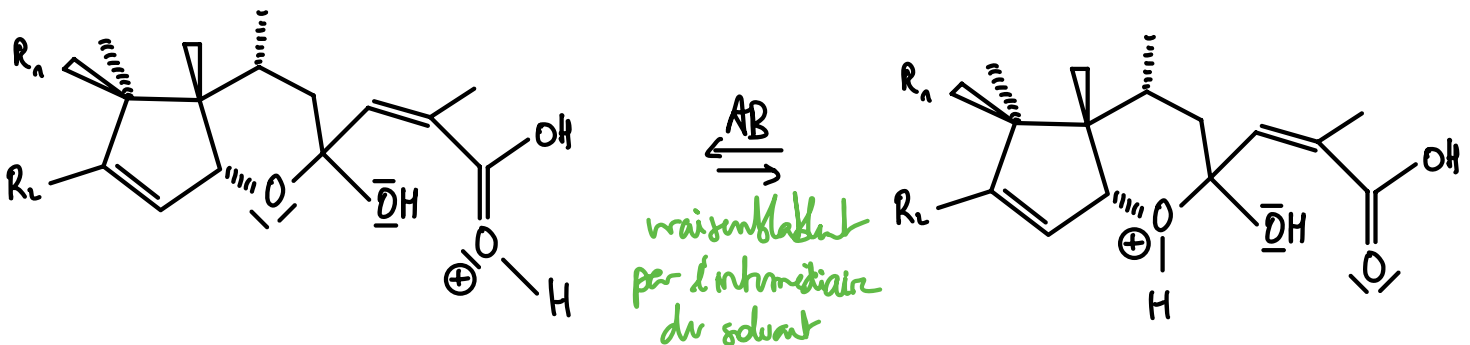
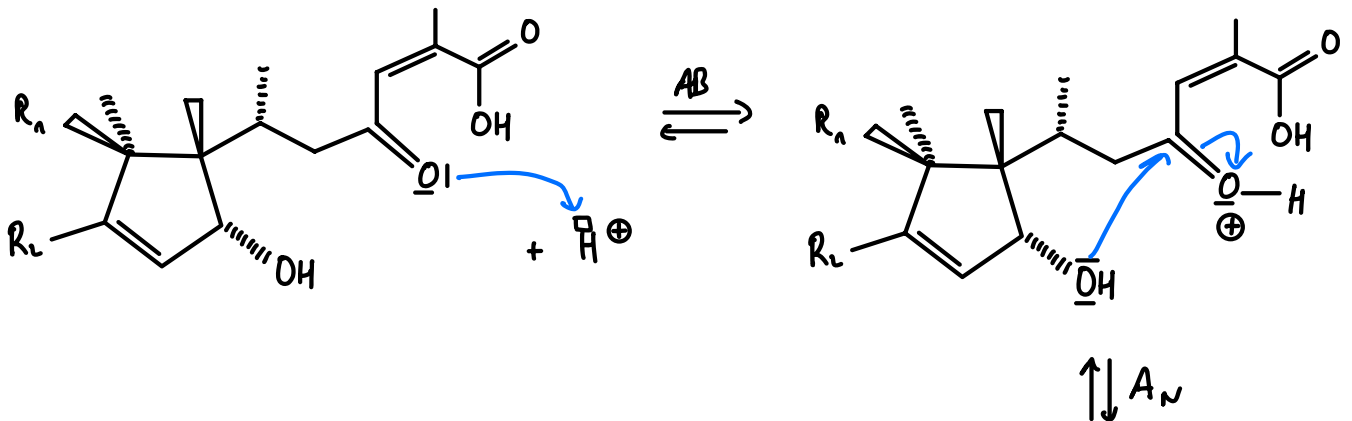
$$\Delta E_{\text{stab}} = E_{\text{SOMO}} - E_L$$

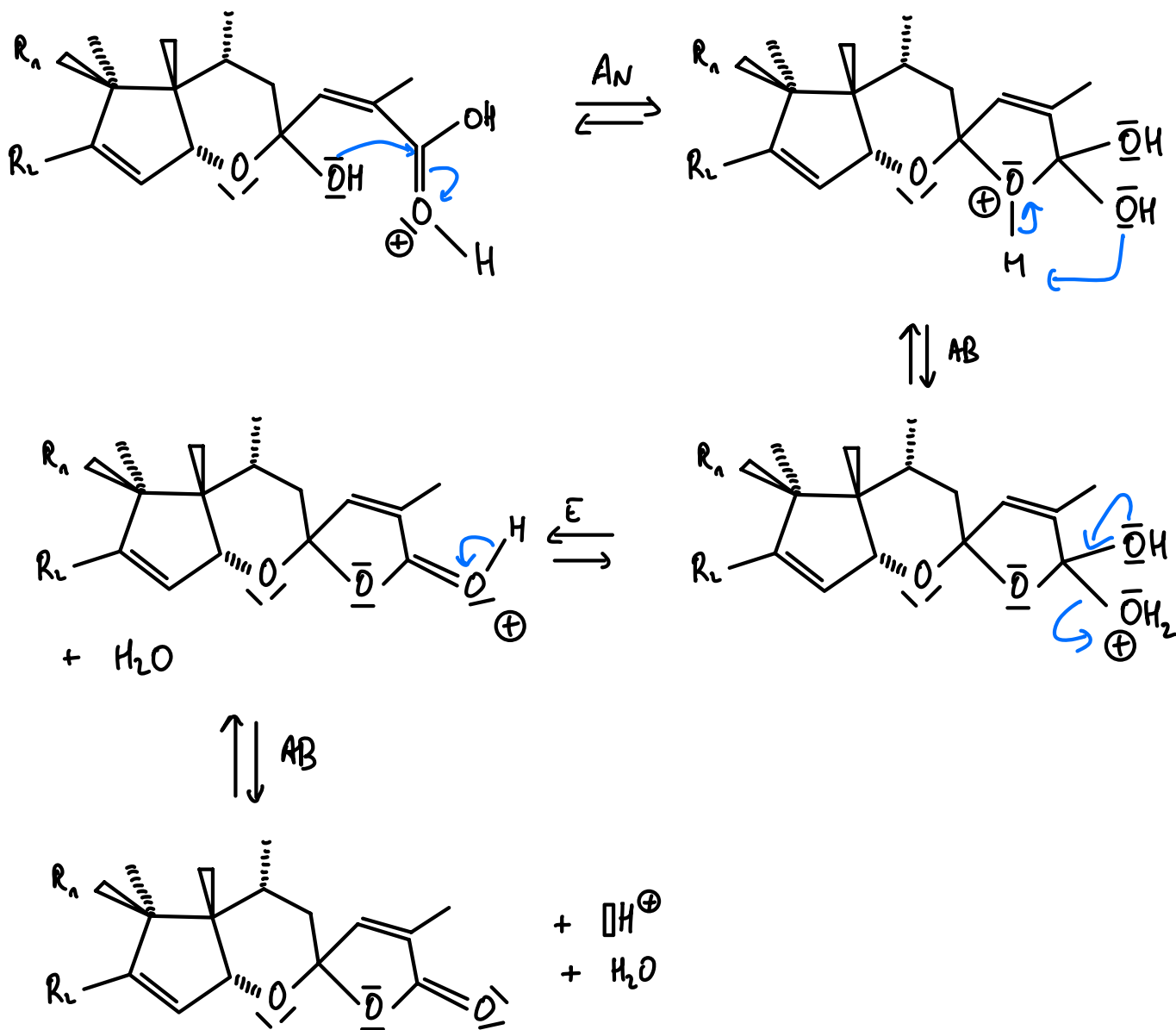
$$\Delta E_{\text{detab}} = E_{\text{AL}} - E_{\text{HO}}$$

$$2 E_L + E_{\text{AL}} < 2 E_{\text{HO}_{\text{furan}}} + E_{\text{SOMO}}$$

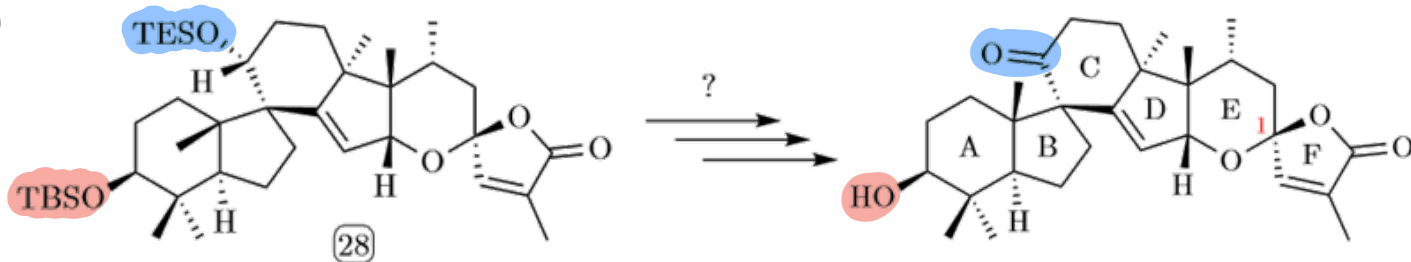
$$0 < \underbrace{\Delta E_{\text{stab}} - \Delta E_{\text{detab}}}_{\text{a priori } \ominus} + \underbrace{E_{\text{HO}} - E_L}_{\oplus}$$

(39) Il se produit une hémiacétylation, avant que le groupe hydroxyle de l'hémi-acétal n'intervienne ds la rétrofication avec l'acide carboxylique.

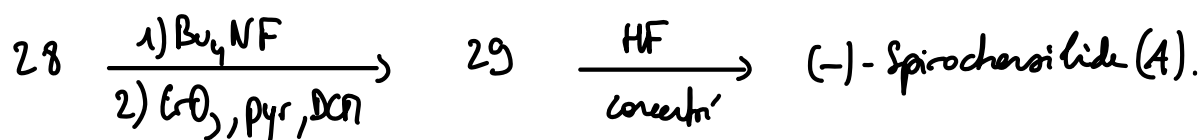




(40)



Il faut déprotéger l'alcool sous forme TESO pr ensuite l'oxyder.
 Ensuite, il faut déprotéger le second alcool qui ne doit pas être oxydé.



2 - Chimie sous-marine : études cinétiques (X/ENS/ESPCI 2024)

A - Cinétique de précipitation

- (41) Avant μ la cristallisation ne démarre : $C(t) = C_0 \Rightarrow \underline{\alpha = 0}$
lorsqu'elle est terminée, $C(t) = 0 \Rightarrow \underline{\alpha = 1}$.

- (42) La quantité de sel ayant cristallisé est notée n_C .
La quantité de matière de sel pouvant au maximum être formée est $n_{\max}$.

$$n_C = (C_0 - C(t))V = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\rho}{M}$$

$$n_{\max} = (C_0 - 0)V = \frac{4}{3}\pi r_{\text{fin}}^3 \frac{\rho}{M}$$

$$\boxed{\frac{n_C}{n_{\max}} = \frac{C_0 - C(t)}{C_0 - 0} = \alpha(t) = \left(\frac{r(t)}{r_{\text{fin}}}\right)^3}$$

Hypothèses mobilisées :

- les grains sont sphériques
- ils sont homogènes (ρ uniforme).

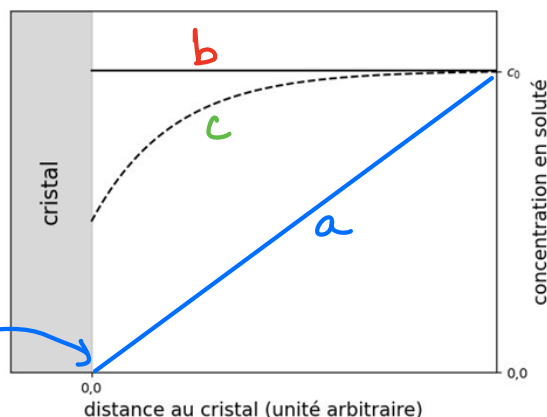
- (43) La convection peut jouer sur l'épaisseur de la couche limite de diffusion autour des grains, et donc sur la cinétique de croissance.

- (44) Profil trait plein : la concentration est uniforme partout autour du grain, il n'y a pas de diffusion.
↳ (b) La réaction de croissance est limitée.

Profil pointillé les 2 phénomènes interviennent.

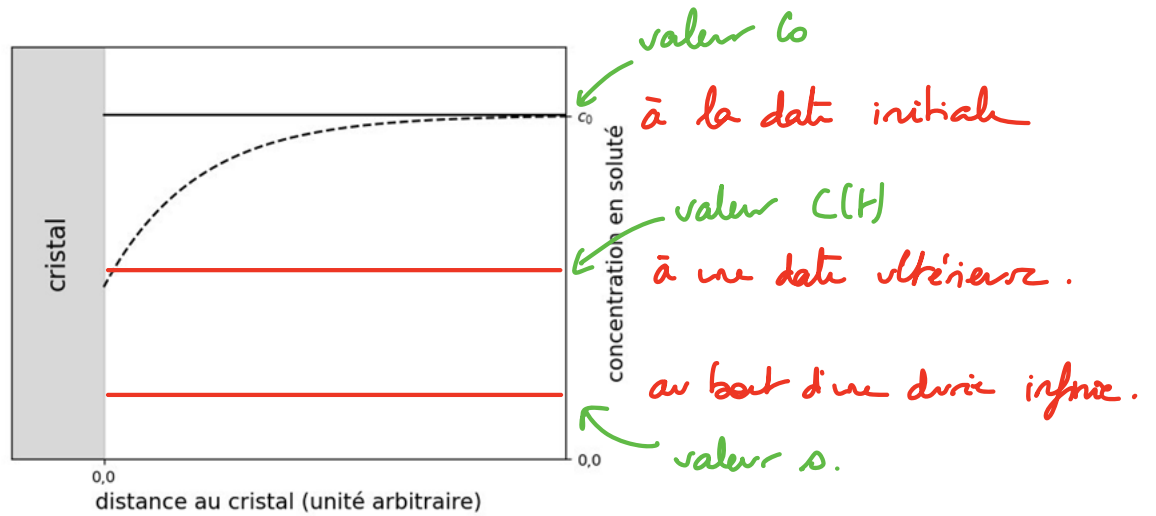
↳ (c)

concentration nulle
à la surface
(flux diffusif alors maximal)



Cas (c)
profil affine car
loi de Fick en
régime stationnaire
sans gradient
local.

- ④⑤ Au fur et à mesure de la croissance du cristal, la concentration dans la solution, au-delà de la couche limite, décroît.



$$\textcircled{46} \quad \frac{dr}{dt} = \frac{\sigma D}{r} (C - s)$$

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0 - s} \Rightarrow 1 - \alpha = \frac{C - s}{C_0 - s} \quad \left. \vphantom{\frac{dr}{dt} = \frac{\sigma D}{r} (C - s)} \right\} \frac{dr}{dt} = \frac{\sigma D}{r} (1 - \alpha)(C_0 - s)$$

$$\text{or } \alpha = \left(\frac{r}{r_{fin}} \right)^3 \rightarrow r = r_{fin} \alpha^{1/3} \text{ et } d\alpha = \frac{3r^2 dr}{(r_{fin})^3}$$

$$\text{donc } \frac{dr}{dt} = \frac{(r_{fin})^3}{3r^2} \frac{d\alpha}{dr} = \frac{\sigma D}{r} (1 - \alpha)(C_0 - s)$$

$$\frac{(r_{fin})^3}{3r} \frac{d\alpha}{dr} = \sigma D (1 - \alpha)(C_0 - s)$$

$$\frac{(r_{fin})^3}{3 r_{fin} \alpha^{1/3}} \frac{d\alpha}{dr} = \sigma D (1 - \alpha)(C_0 - s)$$

$$\boxed{\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3\sigma D}{(r_{fin})^2} (C_0 - s) \alpha^{1/3} (1 - \alpha)}$$

$$\textcircled{47} \text{ Séparation des variables } \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{\alpha^{1/3} (1 - \alpha)} = \frac{3\sigma D}{(r_{fin})^2} (C_0 - s) \underbrace{\int_0^t dt}_= t \Rightarrow \boxed{K_g = \frac{(r_{fin})^2}{3\sigma D (C_0 - s)}}$$

(48) l'expérience (a) donne l'impression d'être + rapide que l'expérience (b).

Or la cristallisation est a priori d'autant plus rapide que la solution est sur-concentrée.

$$(a) \rightarrow 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$(b) \rightarrow 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

(49) $I_D(\alpha)$ paraît proportionnel à t jusqu'à $t \approx 15 \text{ min}$

C'est jusqu'à cette date que la diffusion est limitante (la proportionnalité entre $I_D(\alpha)$ et t avait été établie ds 1 hypothèse de limitation par la diffusion)

(50) à $t = 15 \text{ min}$, $I_D \sim 3 \Rightarrow K_D = \frac{t}{I_D} = \frac{15}{3} = 5 \text{ min}$

$$\text{or } K_D = \frac{(r_{\text{fin}})^2}{30D(l_0 - s)} \Rightarrow D = \frac{(r_{\text{fin}})^2}{30K_D(l_0 - s)}$$

Pour accéder au coefficient de diffusion, il faut connaître les valeurs des autres termes de l'expression. Si certains sont faciles à déterminer (l_0, s, K_D), les deux derniers ne paraissent pas simples à mesurer.

B- Dégradation du DTPA.

(51) la sonde est dégradée à la fois par action de O_3 et par action de $HO^\bullet$.

$$\frac{d[\text{sonde}]}{dt} = -k_{HO,1} [\text{sonde}] [HO^\bullet] - k_{O_3,1} [\text{sonde}] [O_3]$$

$$\frac{d[\text{sonde}]}{dt} = - (k_{HO,1} [HO^\bullet] + k_{O_3,1} [O_3]) [\text{sonde}]$$

$$\frac{d[\text{sonde}]}{dt} \approx -k_{HO,1} [HO^\bullet] [\text{sonde}]$$

séparation
variables
et intégrale

$$\Rightarrow \ln \left(\frac{[\text{sonde}]}{[\text{sonde}]_0} \right) = -k_{HO,1} \int_0^t [HO^\bullet] dt$$

$k_{HO,1} \gg k_{O_3,1}$
donc $k_{HO,1} [HO^\bullet] \gg k_{O_3,1} [O_3]$
tant que ces concentrations
restent dans des ordres de
grandeurs pas trop différents

⚡ $[HO^\bullet]$ dépend de t .

(52) Il faut mesurer $[O_2]$ à différents dates, puis procéder à une intégration numérique.

$[O_2]$ est mesurée par spectrophotométrie à condition que la valeur du coefficient d'absorption molaire soit connue ou mesurée préalablement.

(53) Le modèle précédent prévoit

$$\ln\left(\frac{[seride]}{[seride]_0}\right) = -k_{HO,1} \int_0^t [HO^\bullet] dt = -k_{HO,1} R(t) \underbrace{\int_0^t [O_2] dt}_{\text{exposition totale à l'oxygène.}}$$

abscisse des graphiques.

Le tracé de $\ln\left(\frac{[seride]}{[seride]_0}\right) = f(\text{exposition totale en oxygène})$ étant raisonnablement assimilable à une droite, on en déduit que $k_{HO,1} R(t)$ est quasi-constant.

donc $R(t)$ est constant (car $k_{HO,1} = \text{cte}$ si T fixée).

En notant simplement R cette constante, on a, $\forall t$,

$$\int_0^t [HO^\bullet] dt = R \int_0^t [O_2] dt$$

$$\int_0^t ([HO^\bullet] - R[O_2]) dt = 0$$

$\forall t$, l'intégrale est nulle donc $[HO^\bullet] = R[O_2]$.

les 2 concentrations sont proportionnelles

(54) Vitesse de consommation de l'espèce d'intérêt DTPA-Fe.

$$\begin{aligned} v &= - \frac{d[DTPA-Fe]}{dt} = + k_{HO,2} [HO^\bullet] [DTPA-Fe] + k_{O_2,2} [O_2] [DTPA-Fe] \\ &= (k_{HO,2} [HO^\bullet] + k_{O_2,2} [O_2]) [DTPA-Fe] \end{aligned}$$

Terme constant

$$v = (R k_{HO,2} + k_{O_2,2}) [O_2] [DTPA-Fe] \quad \text{ordre 2}$$

(55) on a par intégration de l'expression précédente :

$$\int_0^t \frac{d[\text{DTPA-Fe}]}{[\text{DTPA-Fe}]} = - \int_0^t (R k_{\text{HO}_2} + k_{\text{O}_3,2}) [\text{O}_3] dt$$

$$\ln \left(\frac{[\text{DTPA-Fe}]}{[\text{DTPA-Fe}]_0} \right) = - (R k_{\text{HO}_2} + k_{\text{O}_3,2}) \underbrace{\int_0^t [\text{O}_3] dt}_{\text{exposition totale à l'ozone.}}$$

Le coefficient directeur permet d'accéder à la donnée manquante ($k_{\text{O}_3,2}$) puisque k_{HO_2} est donnée et que R peut être déterminée à partir du coefficient directeur des courbes de la figure 18 (si k_{HO_2} est connue).

(56) Vitesse de dégradation due à $\text{HO}^\bullet$: $-\left(\frac{d[\text{DTPA-Fe}]}{dt}\right)_{\text{HO}} = k_{\text{HO}_2} [\text{HO}^\bullet] [\text{DTPA-Fe}]$.

due à O_3 : $-\left(\frac{d[\text{DTPA-Fe}]}{dt}\right)_{\text{O}_3} = k_{\text{O}_3,2} [\text{O}_3] [\text{DTPA-Fe}]$

$$\Rightarrow \frac{v_{\text{dégrad per HO}^\bullet}}{v_{\text{dégrad per O}_3}} = \frac{k_{\text{HO}_2}}{k_{\text{O}_3,2}} R.$$

or coef directeur (Fig 18a) = $-k_{\text{HO}_2} R$ (coef dir p 18b identique).

$$\frac{-1,5 - (-0,5)}{7000 - 1000} \frac{1}{10^{-6} \text{ mol l}^{-1} \cdot \text{s}} = -5 \cdot 10^9 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \times R.$$

$$\Rightarrow R = \underline{3,3 \cdot 10^{-8}}$$

$$\frac{v_{\text{dégrad per HO}^\bullet}}{v_{\text{dégrad per O}_3}} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{500} \times 3,3 \cdot 10^{-8} = 0,1.$$

Proportion de dégradation due à l'ozone : $\frac{v_{\text{per O}_3}}{v_{\text{per HO}^\bullet} + v_{\text{per O}_3}} = (1 + 0,1)^{-1}$

$\Rightarrow 91\%$ de la matière est dégradée par l'ozone