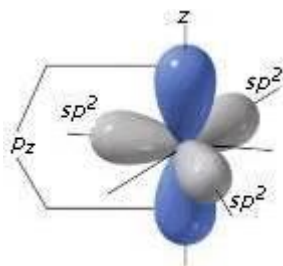
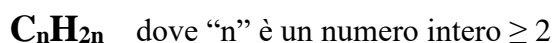


Alcheni e dieni

Gli alcheni

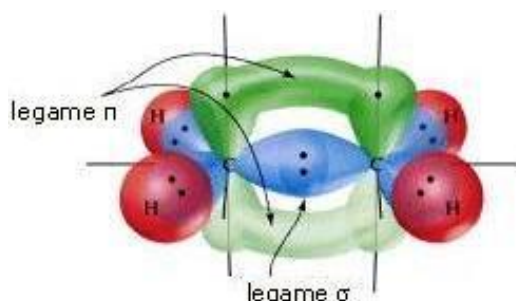
Gli **alcheni** sono gli idrocarburi alifatici insaturi caratterizzati dalla presenza di un **doppio legame**, il gruppo funzionale caratteristico di questa famiglia, e hanno **formula bruta** generale:



In questi composti ognuno dei due atomi di carbonio coinvolti nel doppio legame ha ibridazione sp^2 e quindi una struttura trigonale planare con i tre orbitali sp^2 che si trovano sullo stesso piano diretti ai vertici di un triangolo equilatero con angoli approssimativi di 120° . Il restante orbitale p, occupato da un solo elettrone, è formato da due lobi che giacciono sopra e sotto il precedente piano.

Il **doppio legame** è costituito da:

- un **forte legame σ** , dovuto alla sovrapposizione assiale tra gli orbitali sp^2 di due atomi di carbonio adiacenti,
- un **più debole legame π** che si forma per sovrapposizione laterale dei lobi dei restanti orbitali 2 p dei due atomi di carbonio, posti perpendicolarmente agli orbitali ibridi.



Nell'etilene ogni atomo di carbonio forma **tre forti legami σ** (uno C – C e due C – H) che giacciono tutti sullo stesso piano e un **più debole legame π** (C – C) le cui due nuvole elettroniche si trovano sopra e sotto al piano degli atomi.

Rispetto ad un legame semplice C – C, il legame doppio C = C:

- è più forte (163 kcal/mol contro 88 Kcal/mol);
- ha una lunghezza di legame minore (1,34 nm contro 1,54 nm) perché due doppietti elettronici condivisi trattengono i nuclei più di uno solo;
- impedisce la libera rotazione attorno al legame C – C (per averla si dovrebbe rompere il legame π). La rigidità del doppio legame è all'origine dell'isomeria geometrica.
- è molto più reattivo.

Tutti gli altri atomi di carbonio presenti, facendo parte di una normale catena satura, sono ibridati sp^3 e quindi hanno geometria tetraedrica con angoli di $109,5^\circ$.

L'alchene più semplice è l'etene o etilene, C_2H_4 . Anche gli alcheni costituiscono una **serie omologa** cioè sono una serie di composti nella quale ogni termine differisce da quello successivo per una quantità costante che è, come per gli alcani, il gruppo – **CH₂**.

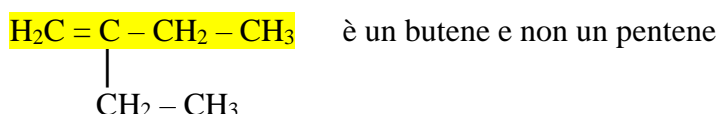
Nomenclatura

Le regole IUPAC per gli alcheni sono analoghe a quelle per gli alcani e si differenziano solo per le specifiche relative alla presenza del doppio legame. In particolare:

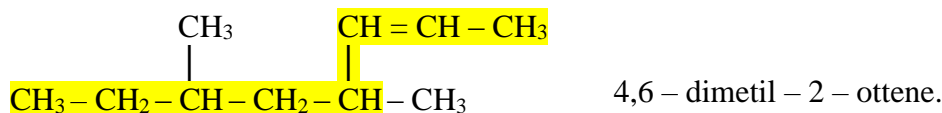
- 1) La desinenza caratteristica degli alcheni è **-ene**. I primi due composti hanno, accanto ai nomi IUPAC, un nome comune molto utilizzato



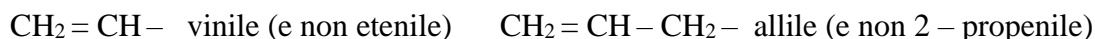
- 2) Il nome base è quello della **catena continua di atomi di carbonio più lunga che contiene il doppio legame**



- 3) La **numerazione** della catena deve iniziare dall'estremità della catena base che **permette di assegnare agli atomi di carbonio del doppio legame i numeri di posizione più bassi**. Per indicare la posizione del doppio legame è sufficiente indicare un **solo numero**, quello dell'atomo di carbonio di questo legame più basso



- 4) La nomenclatura delle ramificazioni segue le regole usuali. Due importanti gruppi hanno nomi comuni da ricordare:



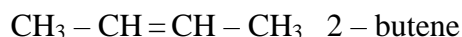
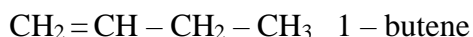
- 5) L'impedimento alla libera rotazione attorno al doppio legame comporta la formazione di isomeri geometrici che devono essere denominati in maniera diversa, utilizzando i prefissi "**cis**" e "**trans**".

Isomeria di posizione e isomeria geometrica

Gli idrocarburi alifatici insaturi presentano tre tipi di isomeria, per cui composti pur avendo la stessa formula grezza/molecolare, sono diversi e quindi hanno struttura e proprietà diverse.

Accanto all'**isomeria di struttura** [stesso numero di atomi di carbonio ma catene lineari o ramificate], già incontrata negli alcani, gli alcheni presentano altri due tipi di isomeria: l'isomeria di posizione e l'isomeria geometrica.

- 1) L'**isomeria di posizione** si verifica quando due alcheni hanno la stessa formula di struttura, ma differiscono per la posizione del doppio legame



Nell'1 - e nel 2 - butene la catena lineare degli atomi di carbonio è la stessa e i due composti differiscono solo per la posizione del doppio legame. N.B. Non esiste il 3 - butene.

Con l'allungarsi della catena il numero dei possibili isomeri di posizione aumenta.

- 2) L'**isomeria geometrica** si verifica quando i due alcheni, identici anche per l'ordine con cui gli atomi sono legati tra di loro, differiscono per il modo in cui gli atomi legati al doppio legame sono orientati nello spazio.

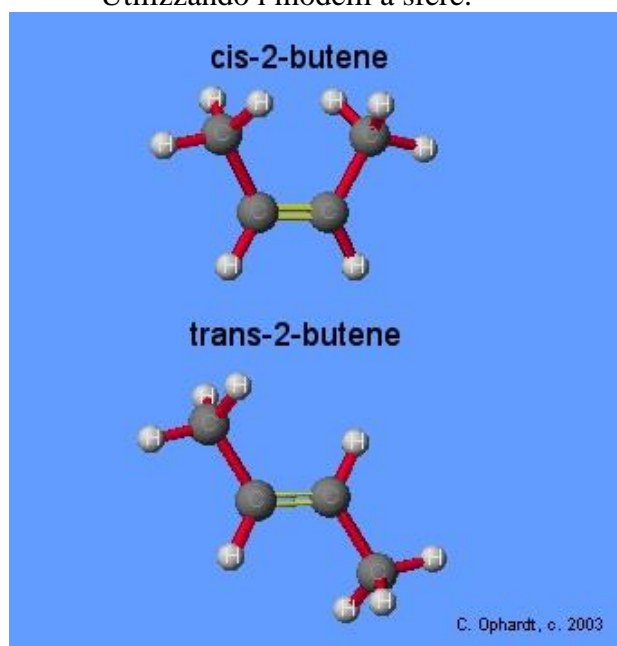
Esistono, per esempio, due isomeri geometrici del 2 - butene ($\text{CH}_3 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_3$) che presentano la stessa sequenza con cui gli atomi sono legati fra di loro e stessa posizione del doppio legame, ma diversa disposizione nello spazio degli atomi posizionati attorno al doppio legame.

Per descrivere questo tipo di isomeria, le formule di struttura devono simulare dei modelli tridimensionali e vanno scritte in maniera tale da rispettare non solo il collegamento degli atomi fra loro ma anche la relativa posizione spaziale reciproca assunta nella molecola.

L'isomeria geometrica che è un particolare tipo di **stereoisomeria** (isomeria che si realizza nello spazio tridimensionale) è dovuta alla presenza del legame π che, con le sue due nuvole elettroniche posizionate sopra e sotto il piano degli atomi coinvolti nel doppio legame, impedisce la libera rotazione attorno al doppio legame $\text{C} = \text{C}$.

Per distinguere i due isomeri geometrici si utilizzano i prefissi "**cis**" e "**trans**".

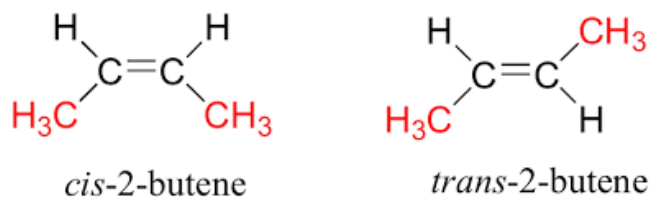
Utilizzando i modelli a sfere:



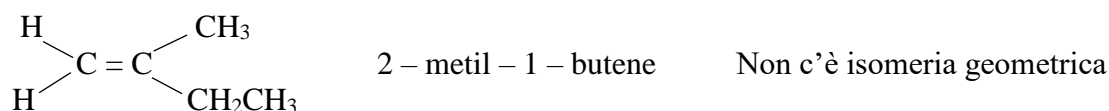
L'**isomero cis** ha **i gruppi uguali** (ma possono anche essere semplicemente due atomi di H) **dalla stessa parte rispetto al doppio legame**

L'**isomero trans** ha **i gruppi uguali** (ma possono anche essere semplicemente due atomi di H) **da parti opposte rispetto al doppio legame**.

Utilizzando le formule di struttura:

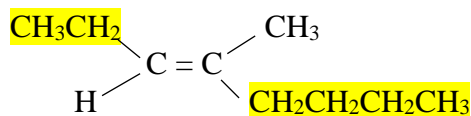


N.B. Non c'è isomeria geometrica quando ad uno dei due atomi di carbonio del doppio legame sono legati due sostituenti uguali.

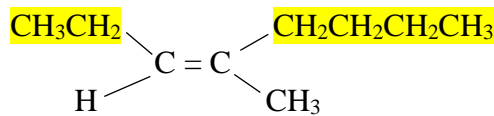


La **stereochemica degli alcheni più sostituiti** è relativamente complessa perché non sempre ci sono due gruppi uguali a cui fare riferimento e quindi non sono utilizzabili i prefissi “cis” e “trans”.

In questi casi si è stabilito di assegnare ai vari sostituenti una “**priorità**”, basata sul numero atomico e sulla lunghezza della catena, e di anteporre al nome, tra parentesi, la lettera “**E**” (dal tedesco entgegen = opposti), se i gruppi a più alta priorità si trovano da parti opposte rispetto al doppio legame o la lettera “**Z**” (dal tedesco zusammen = insieme), quando i gruppi prioritari si trovano dalla stessa parte. Nell'esempio i gruppi legati al doppio legame sono in ordine di grandezza e quindi di priorità:



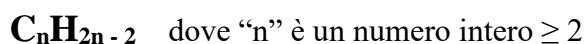
(E) – 4 – metil – 3 - ottene



(Z) – 4 – metil – 3 – ottene

Dieni

I **dieni** sono gli idrocarburi alifatici insaturi caratterizzati dalla presenza di **due doppi legami** e hanno **formula bruta** generale:



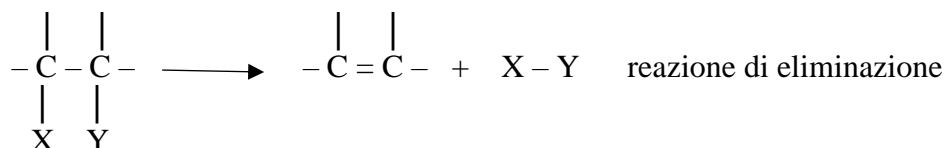
Questi idrocarburi sono denominati utilizzando il suffisso “**adiene**” e la catena è numerata al fine di dare agli atomi di carbonio dei doppi legami i numeri più bassi possibili.



Reazioni di preparazioni degli alcheni

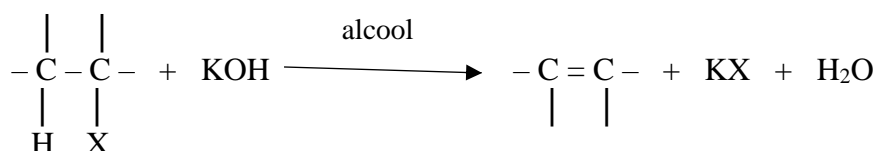
(Reazione di eliminazione)

Gli alcheni fino a 5 atomi di carbonio si ottengono puri dall'industria petrolifera, gli altri si possono preparare mediante **reazioni di eliminazione** il cui meccanismo generale prevede l'allontanamento di atomi o gruppi di atomi da due carboni adiacenti.



Le principali reazioni con cui si preparano gli alcheni o, ancora più importante, si introduce un doppio legame, in una qualsiasi molecola organica, sono:

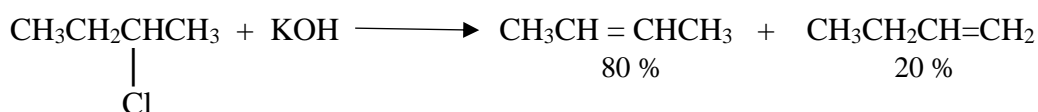
1) Deidrogenazione degli alogenuri alchilici



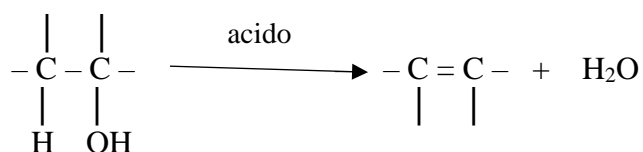
L'eliminazione di un acido alogenidrico (HCl, HBr, HI, HF) dal corrispondente alogenuro alchilico avviene ad opera di basi forti, come KOH, in soluzione alcolica. La reattività degli alogenuri alchilici è: $3^\circ > 2^\circ > 1^\circ$. È, con la disidratazione degli alcoli, la reazione di preparazione degli alcheni più importante.

Meccanismo: lo ione ossidrilico OH^- strappa uno ione H^+ al carbonio, mentre in contemporanea l'alogenione, solvatato, viene allontanato dalle molecole dell'alcol con formazione del doppio legame.

Se l'alogeno non è in posizione terminale, **viene, di preferenza, allontanato l'H legato all'atomo di carbonio più sostituito** (cioè con più gruppi alchilici) e, di conseguenza, si forma l'alchene più ramificato (Regola di Sayteff).



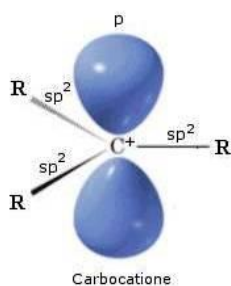
2) Disidratazione degli alcoli



La disidratazione avviene in ambiente acido (H_2SO_4 o H_3PO_4) ad almeno $200^\circ C$ o con Al_2O_3 (allumina) a $350 - 400^\circ C$. Anche in questo caso si elimina l'idrogeno legato all'atomo di carbonio più sostituito e quindi si forma l'alchene più ramificato.

La facilità di disidratazione degli alcoli è: $3^\circ > 2^\circ > 1^\circ$

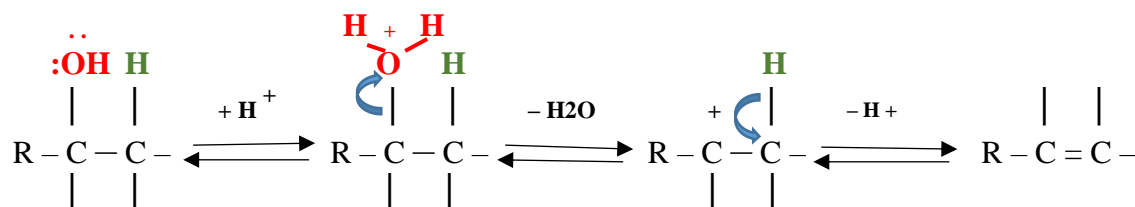
Meccanismo: Avviene in più stadi al contrario della precedente deidroalogenazione in cui l'alogeno e l'idrogeno si staccano contemporaneamente. Nel primo stadio, uno ione H^+ si lega (protonazione) al gruppo $-OH$ dell'alcool con formazione di un buon gruppo uscente, una molecola di acqua, che si allontana mentre si forma un **carbocatione** cioè un atomo di carbonio ibridato sp^2 con l'orbitale p perpendicolare vuoto e quindi caricato positivamente.



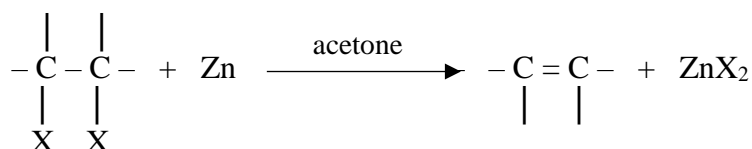
I carbocationi avendo solo 6 elettroni al posto dei soliti 8 sono molto reattivi e quindi si combinano velocemente. In questo caso si allontana uno ione H^+ e i due elettroni del legame $C-H$ vanno a formare il doppio legame dell'alchene.

Tutte e tre le reazioni sono equilibri e quindi facilmente reversibili e tali da portare alla formazione degli alcoli a partire dagli alcheni; per questo motivo i meccanismi con cui può avvenire l'eliminazione (E_1 ed E_2) saranno approfonditi quando si studieranno gli alcoli.

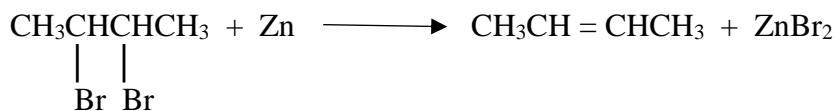
I tre stadi della reazione:



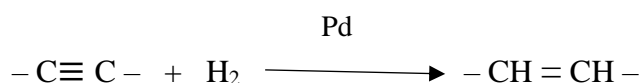
3) Dealogenazione di dialogenuri alchilici vicinali:



Di uso molto limitato perché di norma avviene la reazione opposta. È utilizzata soprattutto come “protezione del doppio legame” se si deve operare su un'altra parte della molecola per poi rigenerarlo con zinco. In alternativa allo zinco si può utilizzare il magnesio.



4) Idrogenazione degli alchini:



Questa reazione non è una eliminazione ma una addizione di idrogeno ad un triplo legame in presenza di un catalizzatore. È necessario utilizzare un catalizzatore “avvelenato” cioè parzialmente disattivato per evitare che il processo di idrogenazione continui fino all'alcane.

Molto utilizzato è il catalizzatore di Lindlar, costituito da palladio su carbonato di calcio avvelenato con sali di piombo, che ha anche il grande vantaggio di formare l'alchene cis.

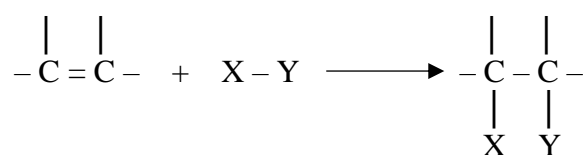


Reazioni degli alcheni

(Reazioni di addizione)

La reattività di questa classe di idrocarburi è strettamente dipendente dalla presenza del doppio legame formato da un forte legame σ assiale e da un più debole legame π laterale che costituisce il punto di attacco della molecola.

Le reazioni tipiche del doppio legame sono **reazioni di addizione** durante le quali si verifica la rottura di questo legame π e di un legame σ del reagente con formazione di due legami σ ; poiché i legami σ sono più forti (di circa 20 – 25 kcal/mole) dei legami π , la reazione è complessivamente favorita. Si chiama reazione di addizione quella in cui due molecole si combinano per formare una sola molecola e lo schema generale è:



Questo tipo di reazioni è possibile solo in presenza di atomi con due o più coppie di elettroni condivisi cioè di atomi legati con legami multipli. Gli elettroni π , che si trovano sopra e sotto il piano della molecola, esercitano un'azione di attrazione minore rispetto a quelli σ nel tenere uniti i nuclei dei due atomi di carbonio e, nello stesso tempo, sono meno legati ai due atomi.

Il **doppio legame si comporta** quindi **come una fonte di elettroni** (base di Lewis) e la reazione avviene grazie all'attacco di reattivi elettrofili, cioè alla ricerca di elettroni (es H^+ , Cl^+ , CH_3^+); per questo motivo l'addizione più tipica al doppio legame è una **addizione elettrofila**.

Anche la geometria molecolare favorisce l'attacco dei reagenti elettrofili perché la nube degli elettroni π , disposta sopra e sotto il piano, è aggredibile con relativa facilità.

Esiste un'altra famiglia di addizioni al doppio legame, anche se meno importante: l'**addizione radicalica**.

Addizione elettrofila

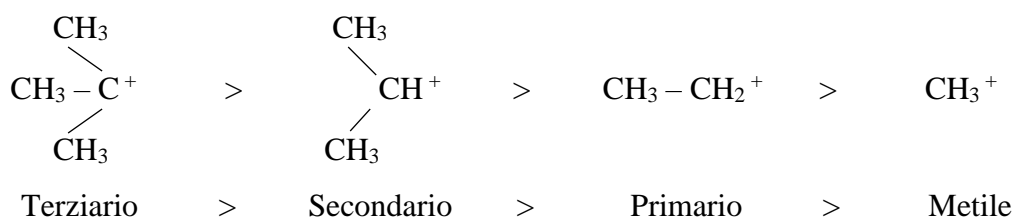
a) Meccanismo e regola di Markovnicov

L'addizione elettrofila avviene grazie all'attacco di un reagente elettrofilo (E^+) e la conseguente formazione di un carbocatione (stadio lento) a cui poi si lega (stadio veloce) il nucleofilo ($:Nu^-$) sull'orbitale vuoto sp^2 del carbocatione. L'addizione avviene di preferenza in posizione trans e l'elettrofilo e il nucleofilo si legano da parti opposte.



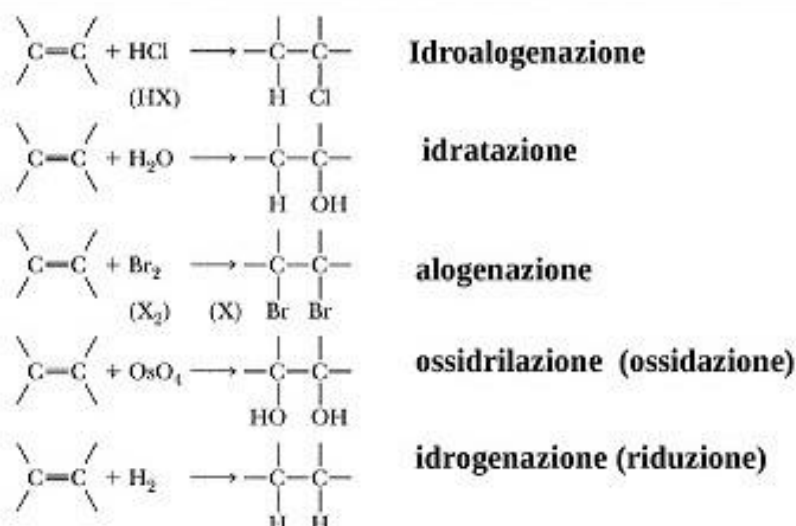
Nell'addizione elettrofila si forma sempre il carbocatione più stabile cioè il più ramificato. Da questa osservazione è derivata la **regola di Markovnicov**, secondo la quale, nell'addizione ai doppi legami, l'elettrofilo si lega all'atomo di carbonio che presenta il maggior numero di atomi di idrogeno.

Per i carbocationi alchilici l'ordine di stabilità è il seguente:



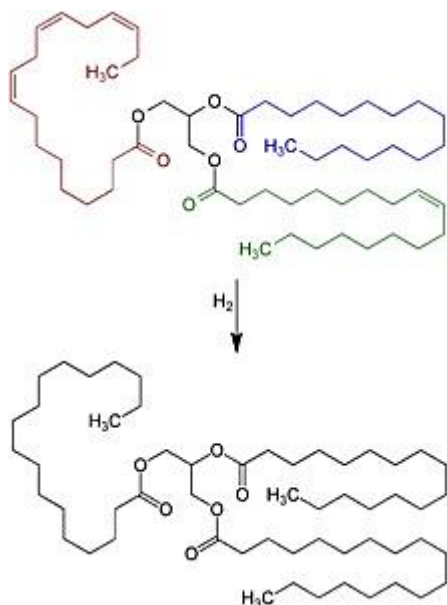
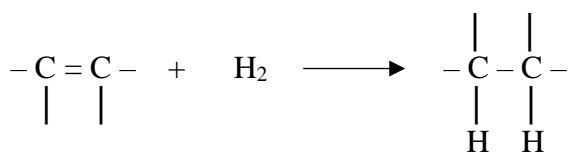
La stabilità è dovuta ad un **effetto induttivo elettrondonatore** dei gruppi alchilici. Questi, essendo più elettronegativi di un atomo di idrogeno, accrescono la densità elettronica dell'atomo di carbonio con la carica positiva (in un certo senso lo riforniscono di elettroni) e quindi lo stabilizzano riducendone, in parte, la carica.

b) Le reazioni di addizione elettrofila



b4) Addizione di idrogeno (Idrogenazione)

Gli alcheni sono facilmente ridotti ad alcani con idrogeno in presenza di un catalizzatore. I catalizzatori più utilizzati sono metalli, come palladio, platino o nichel, finemente suddivisi e dispersi su una matrice di carbone.



L'idrogenazione catalitica dei doppi legami è impiegata nell'industria alimentare per trasformare gli oli vegetali in margarina o in altri grassi alimentari.

La margarina, per esempio, viene ottenuta per idrogenazione dell'olio di soia, di arachidi, di mais o di cotone fino ad ottenere una consistenza simile a quella del burro.

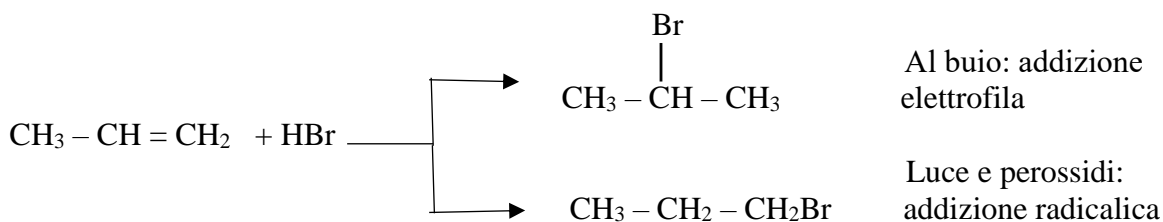
Classico esempio di idrogenazione di un trigliceride

Addizione radicalica

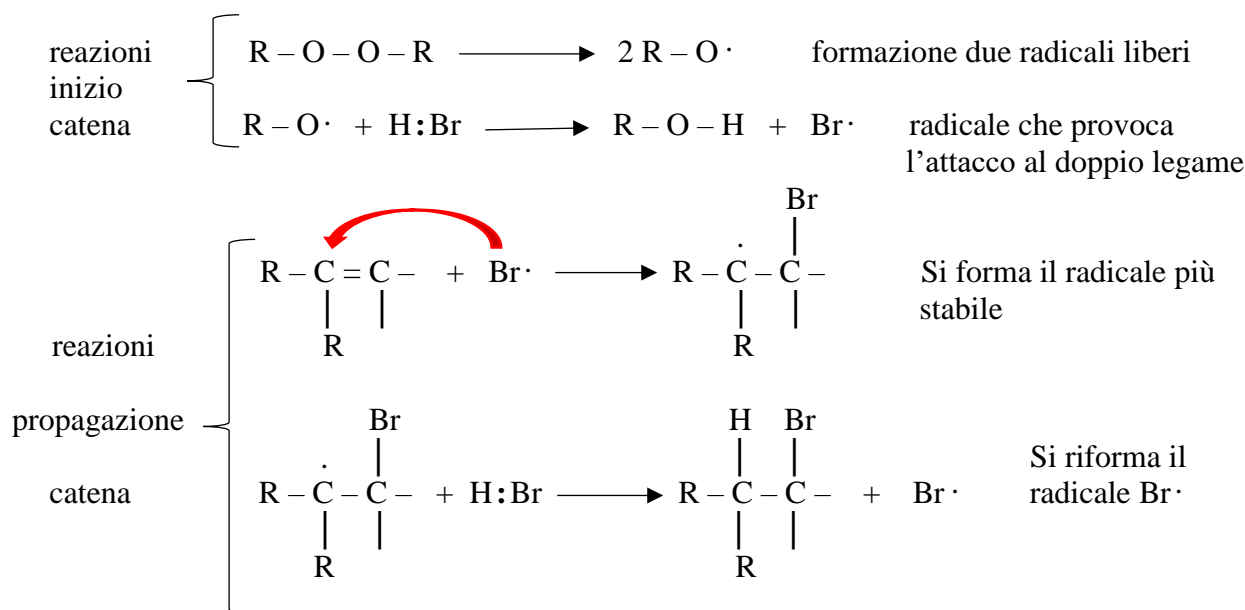
L'altra importante famiglia di addizioni al doppio legame segue un meccanismo completamente diverso perché la specie reattiva è un radicale libero. A questo tipo di reazioni appartengono l'addizione di HBr (in presenza di perossidi) e la polimerizzazione.

a) Addizione radicalica di HBr: meccanismo e prodotti

L'addizione di HBr agli alcheni, se avviene in presenza di perossidi e di luce, porta a prodotti che, in apparenza, non rispettano la regola di Markovnikov con l'idrogeno che si lega all'atomo di carbonio che ha meno idrogeni e formazione dell'alogenuro meno ramificato.



L'anomalia è giustificata con il diverso meccanismo con cui avviene la reazione che, in queste condizioni, è di tipo radicalico.

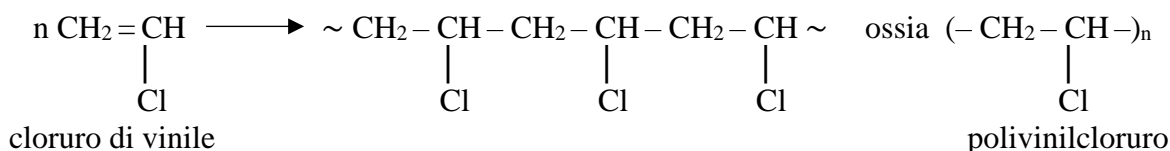
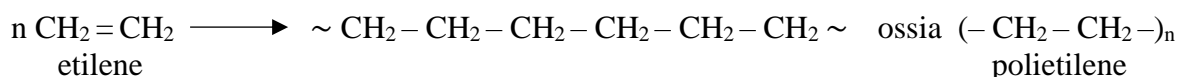


NB – L'addizione radicalica, in realtà, rispetta la regola di Markovnikov però in questo caso si forma il radicale più stabile, cioè quello più sostituito, in quanto l'attacco è condotto da Br·.

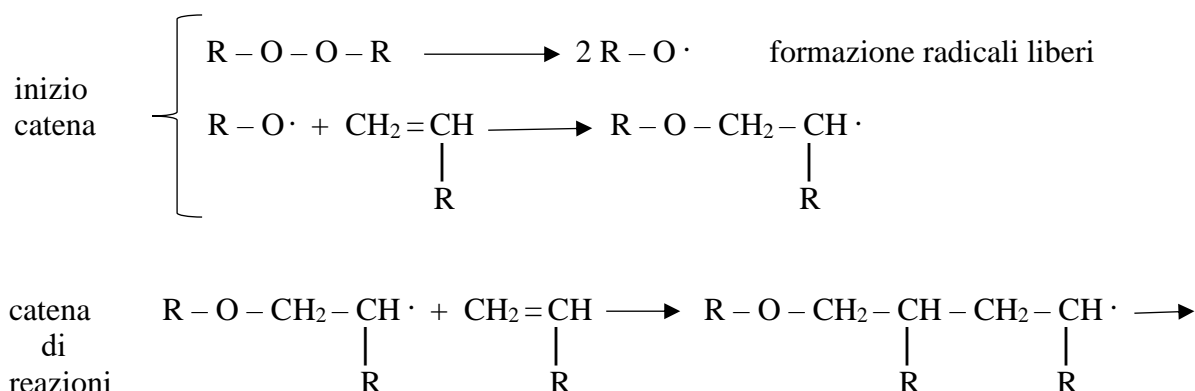
b) Polimerizzazione radicalica degli alcheni: meccanismo e prodotti

La polimerizzazione è un processo che porta alla formazione di macromolecole, i polimeri, (dal greco “molte parti”) per unione di molte piccole molecole, dette monomeri (dal greco “una parte”).

Dall'etilene, scaldato sotto pressione e in presenza di ossigeno, si ottiene un alcano a catena molto lunga (MM circa 20.000 u), noto come polietilene, la materia plastica di moltissimi recipienti flessibili; dal cloruro di vinile, in presenza di perossidi, si ottiene il PVC (cloruro di polivinile). Molti altri gruppi possono essere presenti come sostituenti nell'etilene a formare materie plastiche aventi usi e proprietà molto differenti.



Il meccanismo è radicalico e la reazione richiede la presenza di piccole quantità di un iniziatore, spesso un perossido, che si decompone formando un radicale libero che dà avvio all'addizione.



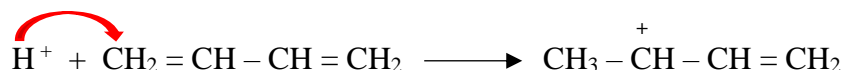
Questa reazione è un esempio di **polimerizzazione a catena** in cui in ogni passaggio si consuma una particella reattiva per produrne una simile altrettanto reattiva.

Reazioni dei dieni coniugati

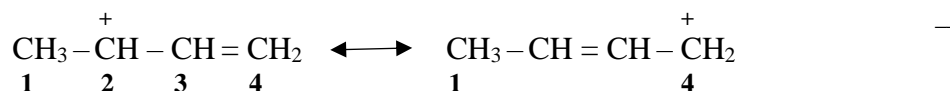
Mentre i dieni isolati, nei quali tra i doppi legami ci sono almeno due legami semplici C - C (esempio, $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH}_2$), danno le normali reazioni degli alcheni, i **dieni coniugati**, nei quali si alternano legami doppi e semplici (esempio $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$), oltre a dare tutte le reazioni tipiche degli alcheni (idrogenazione, addizione elettrofila e radicalica) mostrano alcune particolarità:

- reagiscono più velocemente nelle reazioni di addizione elettrofila perché si formano intermedi di reazione più stabili;
- accanto alla normale reazione di **addizione 1,2** cioè l'addizione sui due atomi di carbonio di un solo doppio legame, presentano **l'addizione coniugata 1,4** sul primo e sull'ultimo dei quattro carboni del sistema dienico.

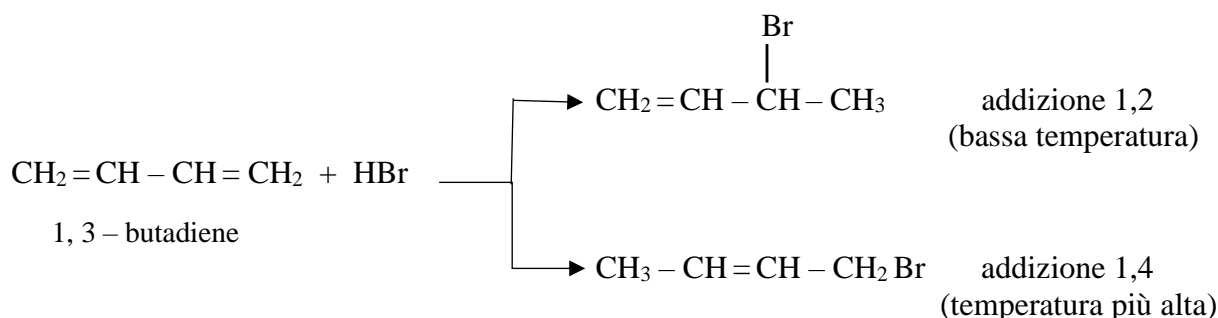
Meccanismo addizione 1,4: Nel primo passaggio l'elettrofilo, il protone H^+ , si addiziona all'atomo di carbonio terminale in accordo con la regola di Markovnikov:



Il carbocatione che si forma è stabilizzato per "risonanza", essendo un ibrido di due strutture in cui gli elettroni π sono disposti in maniera differente:



La carica positiva è “delocalizzata” sia sul carbonio 2, sia sul carbonio 4 e quindi, quando, nel passaggio successivo, il carbocatione somma il nucleofilo (lo ione Br⁻), se questo reagisce con il carbonio 2, si ha l’addizione 1,2 classica mentre se reagisce con il carbonio 4, si ha l’addizione 1,4.



A bassa temperatura (– 60 °C) prevale l’addizione 1,2 mentre a temperatura ambiente prevale il prodotto dell’addizione 1,4. La spiegazione è piuttosto complessa e tiene conto di un diverso controllo (cinetico o termodinamico) per cui non viene riportata [vedere: www.pianetachimica.it, reazioni_dieni_alchini_pdf].

L’addizione 1,4 è possibile per la natura speciale del butadiene e degli alcheni coniugati che presentano le seguenti caratteristiche:

- il legame C₂ – C₃ è pi\`u corto (1,47 nm) di un normale legame semplice degli alcani (1,54 nm) e questo prova che il legame tra quei due atomi ha una certa % di doppio legame;
- la molecola del butadiene ha una struttura planare e anche questo conferma la presenza di una piccola % di doppio legame tra C₂ e C₃;
- il calore di idrogenazione è pi\`u basso rispetto a quello dei corrispondenti dieni non coniugati e quindi queste molecole sono pi\`u stabili.

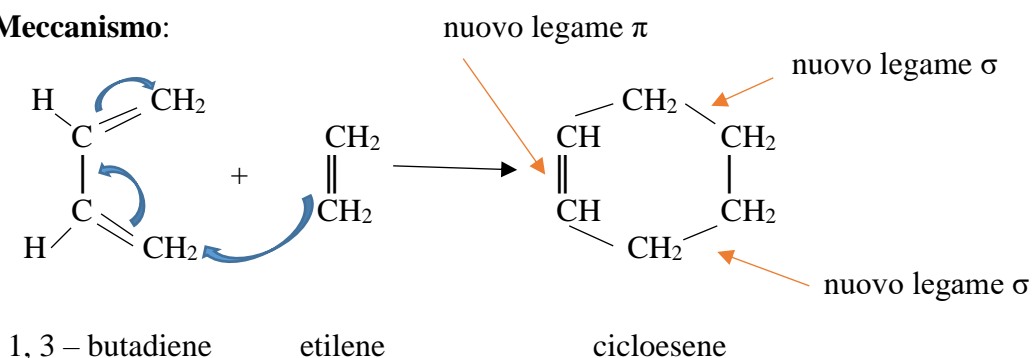
Da ci\`o si pu\`o dedurre che i doppi legami non sono “fissi” fra gli atomi di carbonio C₁ – C₂ e C₃ – C₄, ma “delocalizzati” sull’intera molecola che è meglio descritta da tre strutture in cui gli elettroni π sono disposti in maniera differente, “effetto risonanza”:



Un importante esempio di addizione 1,4 è la **reazione di Dies – Alder**: una cicloaddizione, ci\`oè una addizione che porta alla formazione di un prodotto ciclico, in cui tre legami π sono trasformati in due legami σ e un nuovo legame π .

I due reagenti sono un diene e un dienofilo e la reazione è cos\`i importante per la preparazione dei composti ciclici che i due scopritori, i chimici tedeschi Otto Diels e Kurt Alder hanno ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 1950.

Meccanismo:



Proprietà fisiche degli alcheni

Hanno **proprietà fisiche, molto simili a quelle dei corrispondenti alcani**. Essendo composti che appartengono ad una serie omologa, le proprietà variano in maniera regolare al variare della massa molecolare e della forma più o meno ramificata della molecola.

In questo caso, però, le proprietà dipendono anche da:

- posizione del doppio legame
- isomeria cis/trans.

1) **Temperatura di ebollizione e di fusione e stato di aggregazione**

A temperatura e pressione ambiente, i primi tre alcheni (da C₂ a C₄) sono gassosi, fino a 15 atomi di carbonio sono liquidi mentre a partire da C₁₆ diventano solidi.

Fatta eccezione per gli alcheni più piccoli, la temperatura di ebollizione aumenta di 20 – 30 °C per ogni atomo di carbonio aggiunto alla catena e la ramificazione fa abbassare la temperatura di ebollizione. Le temperature di fusione e di ebollizione sono molto simili a quelle degli alcani con ugual numero di atomi di carbonio perché anche le molecole degli alcheni, che comprendono solo legami covalenti puri sono **apolari** e quindi le uniche interazioni possibili sono le forze di Van der Waals tra i dipoli indotti che sono solo debolmente attrattive ed agiscono a corta distanza.

A causa della **maggior mobilità degli elettroni π del doppio legame**, però, i momenti dipolari, pur essendo molto piccoli, sono comunque maggiori di quelli degli alcani, e questo fattore si riflette soprattutto negli **isomeri “cis” che hanno temperatura di ebollizione più alto e temperatura di fusione più bassa del corrispondente isomero “trans”**.

2) **Solubilità**

Gli alcheni come i dieni sono solubili nei solventi apolari e insolubili in acqua o in solventi più o meno polari. Come solventi, gli alcheni liquidi sciolgono composti apolari o, al massimo, molto debolmente polari: per questo motivo è possibile far scoppiare un palloncino (gomma sintetica) utilizzando la buccia di un'arancia che contiene il limonene.

3) **Densità**

Sono meno densi dell'acqua e la densità aumenta all'aumentare delle dimensioni dell'alchene, tendendo al valore limite di 0,8 g/cm³.

Fonti degli alcheni

Gli alcheni si ottengono su scala industriale soprattutto nel cracking del petrolio: quelli inferiori (fino a 5 atomi di carbonio) si ottengono puri per distillazione frazionata mentre quelli superiori, che non possono essere separati facilmente si utilizzano in miscele o si preparano con le reazioni di preparazione viste in precedenza.

Per quantità di produzione, l'**etilene** è forse il primo composto della chimica organica industriale, seguito dal propene.

L'etilene è un **ormone prodotto dalle piante** dove svolge il ruolo di far germinare i semi, maturare i frutti, appassire i petali dei fiori e le foglie. I chimici hanno sfruttato queste proprietà mettendo a punto composti di sintesi in grado di rilasciare in maniera controllata piccole quantità di etilene (i vegetali sono molto sensibili a questo composto che causa un aumento della respirazione e l'idrolisi della cellulosa già a concentrazioni inferiori a 0,1 p.p.m.) per:

- indurre in alcuni prodotti agricoli (orzo, pomodori, cotone, diversi frutti) una maturazione uniforme e quindi ottenere una raccolta efficiente;
- accelerare artificialmente la maturazione di quei tipi di frutta che, per motivi commerciali si raccolgono sulla pianta prima che siano giunti a completa maturazione, perché in queste condizioni sono in genere più resistenti alle sollecitazioni del trasporto dal luogo di origine ai mercati di utilizzo. Le banane, che vengono generalmente raccolte in Sud America o in Africa ancora verdi per garantire la corretta distribuzione sul mercato mondiale, una volta giunte sul luogo di vendita vengono soffiate con etilene e raggiungono velocemente la maturazione.



Questo processo è però possibile solo per i frutti climaterici che hanno la proprietà di poter continuare la maturazione quando sono staccati dalla pianta e quindi mele, kiwi, banane, cachi ma non arance, limoni, fragole, uva). Le mele, tra i frutti climaterici, sono forse quelle con il più alto tasso di produzione di etilene, così che fungono da stimolatore per la maturazione degli altri frutti.

Caravaggio – Canestro di frutta (1598)

Bibliografia e sitografia essenziale:

- R. T. Morrison, R. N. Boyd – Chimica organica – Casa Editrice Ambrosiana
- G. Valitutti, G. Fornari, M.T. Gando – Chimica organica, biochimica e laboratorio – Zanichelli
- H. Hart, C. Hadad, L. Craine, D. Hart – Chimica organica – Zanichelli
- www.chimica-online.it
- www.pianetachimica.it
- www.chimicamo.org