

Livre récapitulatif des : 2 AMA CVPP

Session 2021/2022

Séances de Cointervention

Semaine du 6 au 12 Septembre

Thème :

Faire un pictogramme pour illustrer des portes de laboratoires de physique

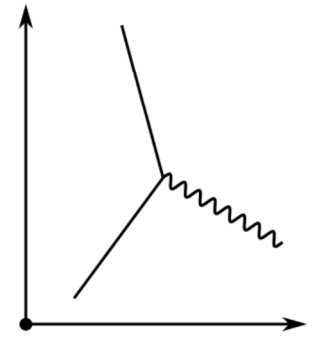
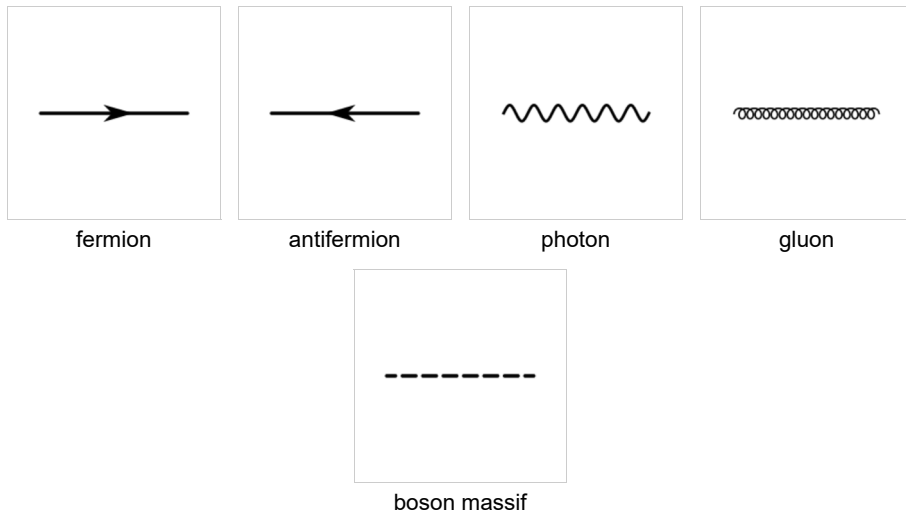
Images tirées des diagrammes de Feynman pour illustrer les forces fondamentales

Interaction forte.

Interaction faible.

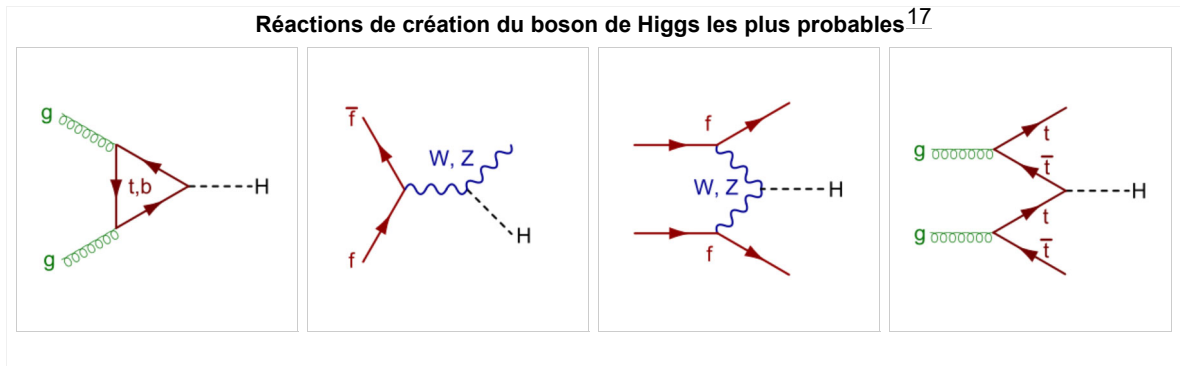
Force électromagnétique.

Force gravitationnelle.

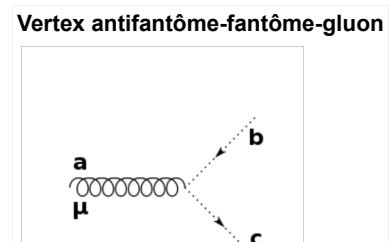


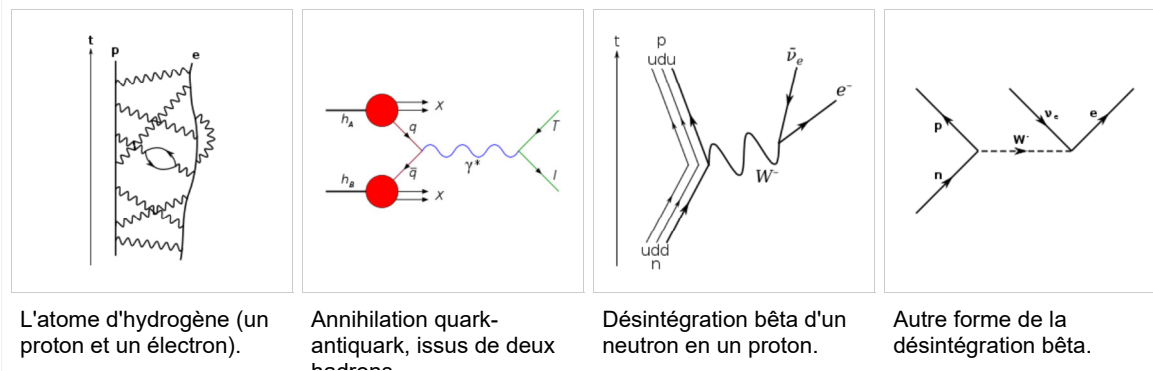
Éléments de base des diagrammes de Feynman : l'espace en abscisse et le temps en ordonnée, avec une interaction entre particules.

Exemples de diagrammes utilisant plusieurs types de particules :



Le fantôme de Faddeev-Popov (**en**) est tracé avec une ligne de points¹⁸ :

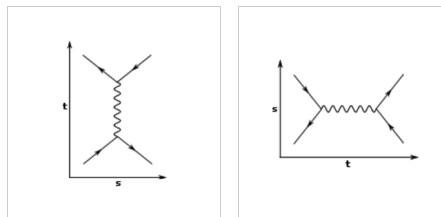




Conventions

Un phénomène lumineux ou électronique, représenté dans un diagramme de Feynman, est appelé « séquence »¹⁹. Les séquences se déroulent dans l'espace-temps, représenté dans un repère avec l'espace en abscisse, simplifié à une seule dimension au lieu de trois, et le temps en ordonnée²⁰. Feynman préférait orienter le temps vers le haut, ce choix étant purement arbitraire, mais les physiciens des particules semblent préférer de plus en plus l'orientation de gauche à droite^{Note 5, 21}.

Conventions d'espace et de temps



Temps vers le haut, convention de Feynman

Temps vers la droite, convention constatée

Les fermions sont représentés par une ligne droite orientée par une flèche et les particules vectrices de force (les bosons) par une ligne ondulée ou en pointillé. La séquence d'émission ou d'absorption d'un photon est appelée « jonction » ou « couplage » ; elle est représentée par un vertex, point de jonction des lignes²². Le couplage nomme indifféremment l'émission ou l'absorption parce que les deux phénomènes ont la même amplitude, égale à la constante de structure fine α pour l'électrodynamique quantique ou à la constante de couplage de l'interaction nucléaire forte α_s pour la chromodynamique quantique.

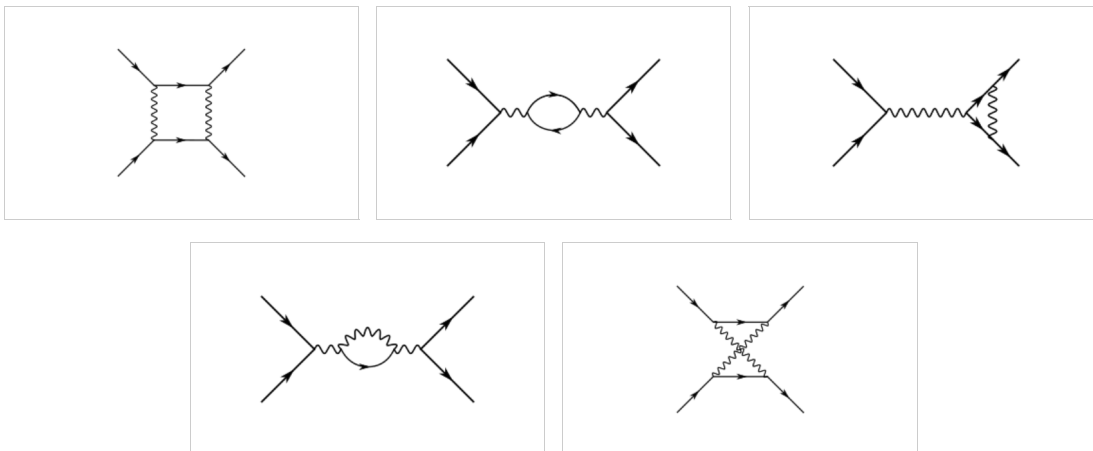
Un diagramme est construit avec trois éléments : des vertex où l'énergie et l'impulsion sont conservées, des lignes externes représentant les particules réelles qui entrent et sortent, et des lignes internes représentant des particules virtuelles¹⁵. À chaque ligne ou vertex est associé un facteur qui contribue à l'amplitude de probabilité du processus décrit, le facteur associé à une particule virtuelle (ligne interne) est nommé propagateur²³.

Propriétés

Une interaction est décrite par un ensemble de diagrammes de Feynman et définie par ses particules

approximation valable avec six chiffres significatifs²⁷.

Exemples de diagrammes à quatre vertex



Pour des cas particuliers, il est nécessaire de pousser la précision du calcul aux ordres supérieurs. Par exemple en 2012, pour calculer la valeur de la constante de structure fine, une équipe de physiciens a mesuré le facteur de Landé dans un cyclotron pour le comparer à un calcul théorique à l'ordre 10 faisant intervenir 12 672 diagrammes de Feynman. La précision obtenue était alors inférieure au milliardième²⁸.

Interactions élémentaires

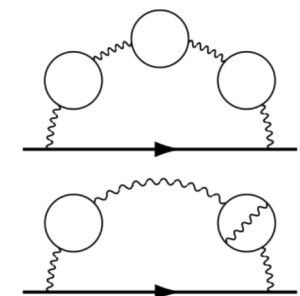
Les diagrammes de Feynman permettent de décrire les trois interactions élémentaires, autres que la gravité.

Électrodynamique quantique

Dans cette théorie, trois séquences de base permettent de générer tous les phénomènes physiques qui font intervenir de la lumière et des électrons¹⁹ :

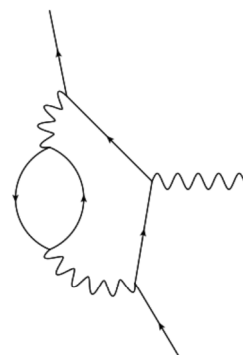
1. un photon va d'un endroit à un autre ;
2. un électron va d'un endroit à un autre ;
3. un électron émet ou absorbe un photon.

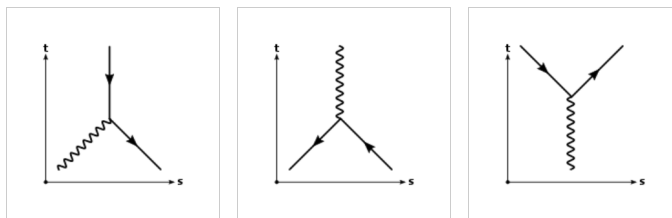
Plus généralement, l'électrodynamique quantique traite des interactions entre les particules chargées (ce qui inclut les électrons et leurs antiparticules, les positrons) et le champ électromagnétique (dont les vecteurs de force sont les photons) ; dans les diagrammes de Feynman, l'électron est représenté avec une flèche qui va dans le sens du temps, le positron avec une flèche qui va dans le sens contraire, et le photon avec une ligne ondulée^{Note 7, 30}.



Deux diagrammes d'ordre 8 qui ont servi à calculer la valeur de la constante de

Les interactions entre ces trois particules se réduisent à un seul schéma de jonction, ou *vertex*, composé d'une flèche entrante, d'une flèche sortante et d'une connexion avec un photon. Selon l'orientation





Un positron absorbe un photon : $e^+ + \gamma \rightarrow e^+$

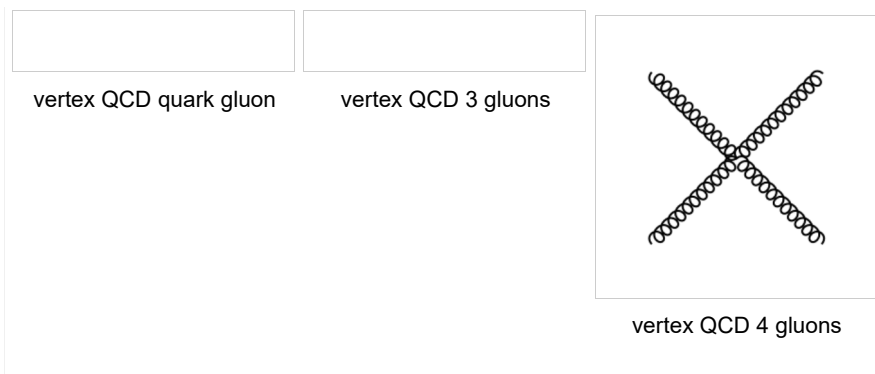
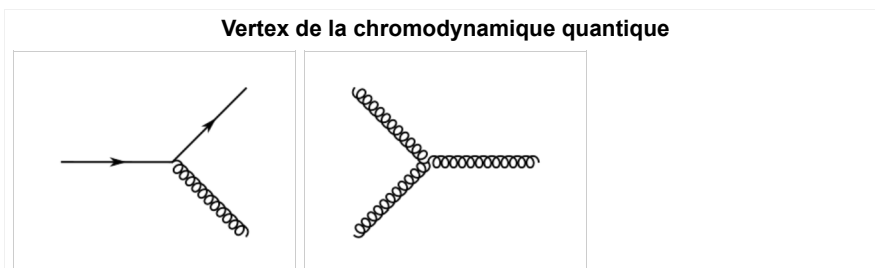
Un positron et un électron s'annihilent en un photon : $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$

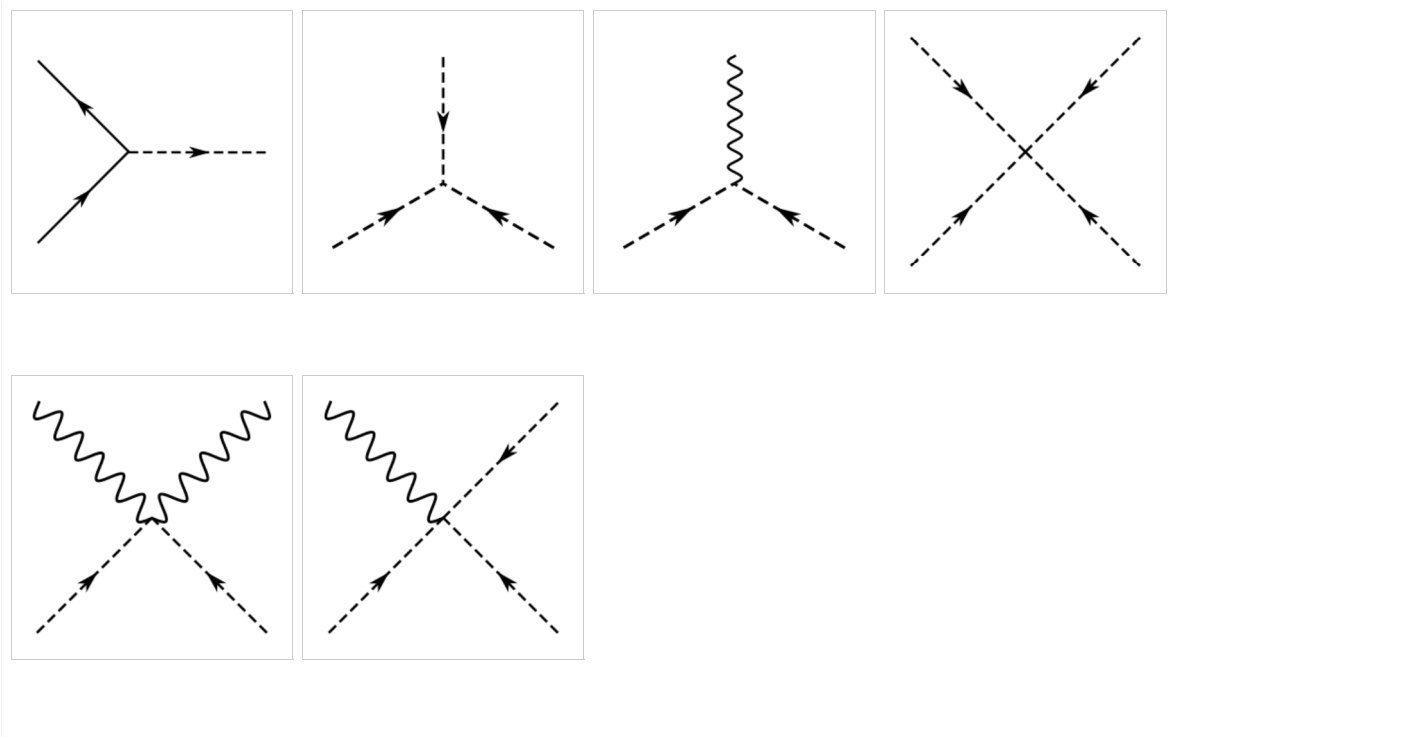
Un photon crée un électron et un positron : $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

Toutes les interactions entre particules chargées et lumière sont construites à partir de ces briques de base, et uniquement celles-ci, parce qu'elles suivent les lois de conservation, en particulier la conservation de l'énergie, la conservation de la quantité de mouvement (ou impulsion) et la conservation de la charge électrique. Toute interaction plus complexe est une combinaison de ces six vertex³².

Chromodynamique quantique

En 1968, Richard Feynman montre que ses diagrammes peuvent aussi s'appliquer à l'interaction forte, ils permettent donc de décrire la chromodynamique quantique en ajoutant de nouvelles règles. Le processus fondamental analogue à la réaction électron-photon de l'électrodynamique est alors la réaction quark-gluon, dans laquelle la charge de couleur est conservée (mais pas la saveur). Les gluons portant comme les quarks des charges de couleur (contrairement aux photons qui sont neutres) il existe des vertex impliquant uniquement des gluons³³ :





Signification

Les diagrammes de Feynman ne représentent pas des trajectoires de particules. Mathématiquement, ils sont un « moyen graphique de représenter le contenu du théorème de Wick »¹³. En effet, dans la quantification canonique de la théorie quantique des champs, un diagramme correspond à un terme de l'expansion de Wick dans le développement perturbatif de la matrice de diffusion.

Calcul de l'amplitude par des séries perturbatives

Aucune méthode ne permet de calculer les solutions exactes des équations donnant l'état d'un système quantique, il faut donc recourir à des approximations appelées séries perturbatives. Les diagrammes de Feynman permettent de visualiser et d'organiser simplement les termes de ces séries³⁸.

La théorie permet de prédire des valeurs de sections efficaces ; ces valeurs sont comparées aux résultats d'expériences en physique des particules pour évaluer la fiabilité d'un modèle théorique donné. On utilise généralement la différentielle de cette section efficace, qui est fonction du module au carré de l'amplitude de diffusion, notée \mathcal{M} ³⁹ :

$$d\sigma = \frac{1}{E^2} |\mathcal{M}|^2 d\Omega$$

- où E est l'énergie supposée égale de chacun des deux faisceaux de particules qui ont participé à l'expérience.

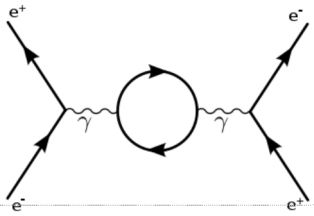


Diagramme de Feynman avec 4 vertex, et donc une contribution de e^4 .

Avec un diagramme de Feynman, la contribution d'un terme perturbatif est immédiate : un vertex apporte une contribution égale à e , tous les termes peuvent alors être classés selon leur contribution, e^2 , e^4 , e^6 , etc⁴⁵. Pour trouver la probabilité de changement d'état quantique du phénomène étudié, il ne reste plus qu'à calculer uniquement les termes nécessaires à la précision souhaitée en éliminant l'infinité des autres cas possibles⁴⁶.

Particules virtuelles

Aux débuts de l'électrodynamique quantique, dans les années 1930, les calculs sur les cas les plus simples, comme connaître la probabilité de diffusion des deux électrons, donnait souvent des valeurs infinies : des approximations limitées étaient possibles, mais dès que l'on souhaitait trouver des valeurs plus précises on retombait sur des infinis. Cela vient du fait que les photons virtuels échangés dans cette interaction peuvent avoir une énergie très grande tant qu'elles l'utilisent sur un temps très court. En plus d'avoir des énergies illimitées, les particules virtuelles échangées ne sont pas non plus limitées en nombre : les équations algébriques nécessitent des termes mathématiques dont le nombre augmente exponentiellement avec celui des photons⁴⁷.

Le calcul de l'intégrale de chemin, qui donne la probabilité pour une particule quantique de passer d'un point à un autre, nécessite d'ajouter les contributions de tous les chemins possibles entre ces deux points, ainsi que celles des chemins impossibles⁴⁸. Un calcul exact n'est pas réalisable parce qu'il faudrait faire la somme d'une infinité d'états intermédiaires⁴⁹. Les diagrammes de Feynman permettent de trouver parmi cette infinité de possibilités la probabilité recherchée, et cela avec des règles extrêmement simples⁵⁰.

Propagateurs

Dans les diagrammes de Feynman, les propagateurs sont les contributions des particules virtuelles. Leur nom vient du fait qu'ils décrivent la propagation de ces particules qui se déplacent librement sauf aux points d'émission ou d'absorption⁵¹. Richard Feynman a appliqué les fonctions de Green aux particules élémentaires sous la forme d'un opérateur particulier de la théorie quantique des champs qu'il a nommé propagateur⁵².

Pour un boson libre, l'équation de Klein-Gordon donne l'équation de mouvement :

$$(\mathbf{p}^2 - m^2)\psi(\mathbf{p}) = 0$$

- où $\psi(\mathbf{p})$ est une fonction d'onde scalaire.

Alors, la fonction de Green $G(\mathbf{p})$ est solution, dans l'espace des impulsions, à l'équation :

$$(\mathbf{p}^2 - m^2)G(\mathbf{p}) = \delta^4(\mathbf{p})$$

- où δ est la distribution de Dirac, avec $\delta^4(\mathbf{p}) = \delta(p_0)\delta(p_1)\delta(p_2)\delta(p_3)$.

Ce qui s'écrit aussi :

$$G(\mathbf{p}) = \frac{\delta^4(\mathbf{p})}{\mathbf{p}^2 - m^2}.$$

Feynman interprète $G(\mathbf{p})$ comme l'amplitude de probabilité associée au boson se propageant avec le quadri-moment \mathbf{p} , qui vaut :

interpréter les équations de la théorie des champs¹¹. Il leur trouvait d'ailleurs un air comique quand il a commencé à les dessiner, et ils n'avaient rien d'intuitif lorsqu'il les a présentés aux autres physiciens⁵⁶.

Cependant, leur succès tient au fait qu'ils forment une aide précieuse pour la visualisation et la manipulation des séries perturbatives, d'autant plus que chaque terme algébrique peut être traduit en diagramme de Feynman et inversement⁴². Julian Schwinger leur donnait ainsi des vertus pédagogiques et non physiques⁵⁷.

Si on simplifie au maximum, on peut dire que les diagrammes de Feynman montrent la diffusion des électrons et des photons sous une forme très abstraite. Mais la plupart des physiciens évitent d'utiliser cette analogie⁵⁸.

Ces diagrammes sont parfois confondus avec ceux de Minkowski, qui existaient avant ceux de Feynman, et qui décrivent intuitivement des propriétés de l'espace-temps dans la théorie de la relativité restreinte⁵⁹.

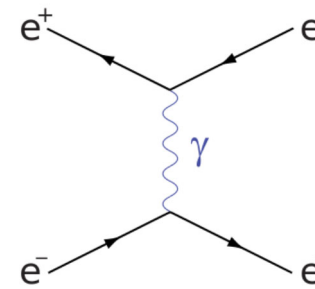
Règles de Feynman

Les règles de Feynman traduisent directement un diagramme en une contribution de ***M***, elles font correspondre un facteur algébrique à chaque élément et le produit de ces facteurs donne la valeur de cette contribution (la somme des contributions donne une valeur approchée de ***M***)⁴⁰.






Pour les formules algébriques qui suivent, on se place dans le système d'unités naturelles où la constante de Planck réduite ***ħ*** et la vitesse de la lumière ***c*** sont des unités, et donc : ***ħ = c = 1***.


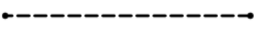
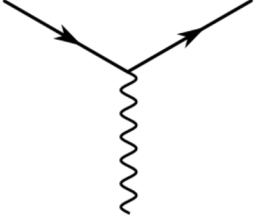
Électrodynamique quantique

Règles de Feynman pour calculer ***−iM*** en électrodynamique quantique⁶⁰ :



Diffusion Bhabha : le positron et l'électron semblent se repousser alors que physiquement ils s'attirent.

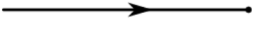
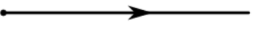
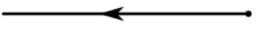


Catégorie	Symbole	Spin	Particule(s)	Facteur multiplicateur
		0	boson entrant	1
		0	boson sortant	1
		0	antiboson entrant	1
		0	antiboson sortant	1
		½	fermion entrant	<i>u</i>

		1	particule sans masse (photon)	$\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}$
		1	particule massive (boson)	$\frac{-i(g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / m^2)}{q^2 - m^2}$
Vertex				$-ig_e \gamma^\mu$

- où u et v sont les spineurs de Dirac, avec pour $u(p)$ normalisé : $\bar{u}(p)u(p) = 2m$,
- ϵ_μ le vecteur de polarisation circulaire du photon,
- m la masse de la particule,
- i l'unité imaginaire,
- $\not{q} = \gamma^\mu q_\mu$ pour le quadri-moment q_μ et la matrice de Dirac γ^μ ,
- $g_{\mu\nu}$ la métrique de Minkowski,
- g_e la charge de l'électron.

Chromodynamique quantique

Règles de Feynman en chromodynamique quantique⁶¹ :

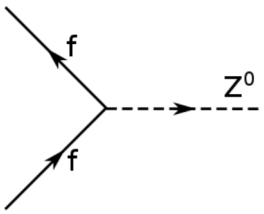
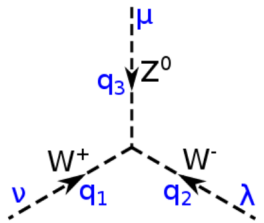
Catégorie	Symbole	Particule(s)	Facteur multiplicateur
Lignes externes		quark entrant	$u^{(s)}(p)c$
		quark sortant	$\bar{u}^{(s)}(p)c^\dagger$
		antiquark entrant	$\bar{v}^{(s)}(p)c^\dagger$
		antiquark sortant	$v^{(s)}(p)c$
		gluon entrant	$\epsilon_\mu(p)a^\alpha$

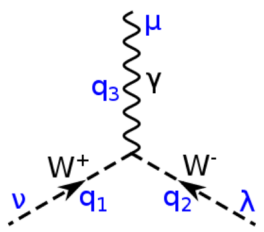
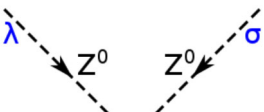
	<p>3 gluons</p>	$-g_s f^{\alpha\beta\gamma} [g_{\mu\nu} (k_1 - k_2)_\mu + g_{\nu\lambda} (k_2 - k_3)_\nu + g_{\lambda\mu} (k_3 - k_1)_\lambda]$
	<p>4 gluons</p>	$-ig_s^2 [f^{\alpha\beta\eta} f^{\gamma\delta\eta} (g_{\mu\lambda} g_{\nu\rho} - g_{\mu\rho} g_{\nu\lambda}) + f^{\alpha\delta\eta} f^{\beta\gamma\eta} (g_{\mu\nu} g_{\lambda\rho} - g_{\mu\lambda} g_{\nu\rho}) + f^{\alpha\gamma\eta} f^{\delta\beta\eta} (g_{\mu\rho} g_{\nu\lambda} - g_{\mu\nu} g_{\lambda\rho})]$

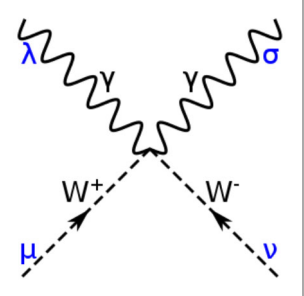
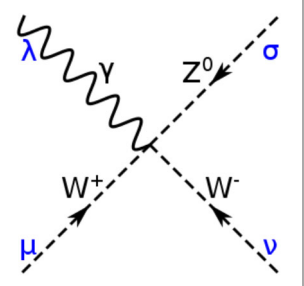
Interaction faible

Règles de Feynman pour l'interaction faible⁶² :

Catégorie	Symbole	Particule(s)	Facteur multiplicateur
Vertex		<p>boson W^-, un lepton et son <u>neutrino</u></p>	$\frac{-ig_w}{2\sqrt{2}} \gamma^\mu (1 - \gamma^5)$
		<p>boson W^-, un quark et son antiquark</p>	$-ig_w \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma^\mu \frac{\lambda^a}{2}$

	<p>boson Z^0 et f un quark ou un lepton</p>	$\frac{-ig_z}{2} \gamma^\mu (c_V^f - c_A^f \gamma^5)$ <table border="1" data-bbox="1052 199 1400 502"> <thead> <tr> <th>f</th> <th>C_V</th> <th>C_A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ν_e, ν_μ, ν_τ</td> <td>$\frac{1}{2}$</td> <td>$\frac{1}{2}$</td> </tr> <tr> <td>e^-, μ^-, τ^-</td> <td>$-\frac{1}{2} + 2 \sin^2 \theta_w$</td> <td>$-\frac{1}{2}$</td> </tr> <tr> <td>$u, c, t$</td> <td>$\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \theta_w$</td> <td>$\frac{1}{2}$</td> </tr> <tr> <td>$d, s, b$</td> <td>$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \theta_w$</td> <td>$-\frac{1}{2}$</td> </tr> </tbody> </table>	f	C_V	C_A	ν_e, ν_μ, ν_τ	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	e^-, μ^-, τ^-	$-\frac{1}{2} + 2 \sin^2 \theta_w$	$-\frac{1}{2}$	u, c, t	$\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \theta_w$	$\frac{1}{2}$	d, s, b	$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \theta_w$	$-\frac{1}{2}$
f	C_V	C_A															
ν_e, ν_μ, ν_τ	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$															
e^-, μ^-, τ^-	$-\frac{1}{2} + 2 \sin^2 \theta_w$	$-\frac{1}{2}$															
u, c, t	$\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \theta_w$	$\frac{1}{2}$															
d, s, b	$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \theta_w$	$-\frac{1}{2}$															
	<p>les 3 bosons</p>	$ig_w \cos \theta_w [g_{\nu\lambda} (q_1 - q_2)_\mu + g_{\lambda\mu} (q_2 - q_3)_\nu + g_{\mu\nu} (q_3 - q_1)_\lambda]$															

	<p>les 2 bosons W et un photon</p>	$ig_e [g_{\nu\lambda} (q_1 - q_2)_\mu + g_{\lambda\mu} (q_2 - q_3)_\nu + g_{\mu\nu} (q_3 - q_1)_\lambda]$
		

	les 2 bosons W et 2 photons	$-ig_e^2(2g_{\mu\nu}g_{\lambda\sigma} - g_{\mu\lambda}g_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma}g_{\nu\lambda})$
	les 2 bosons W, un boson Z et un photon	$-ig_e g_w \cos \theta_w (2g_{\mu\nu}g_{\lambda\sigma} - g_{\mu\lambda}g_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma}g_{\nu\lambda})$

Applications

La plupart des propriétés connues des particules ont été déterminées par des expériences de diffusion⁶³. Un des buts des diagrammes de Feynman est de calculer la section efficace théorique d'un phénomène pour la comparer aux valeurs expérimentales. Une fois les règles de Feynman établies, il suffit d'appliquer une recette à un processus physique donné pour en calculer l'amplitude : choisir les particules entrantes et sortantes, dessiner tous les diagrammes possibles jusqu'à la précision voulue, écrire les formules des amplitudes de chaque diagramme à partir des règles, sommer toutes ces formules pour obtenir l'amplitude du processus⁶⁴.

Réaction $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$

La réaction d'annihilation d'une paire électron-positron qui donne une paire muon-antimuon est la plus simple et la plus importante de

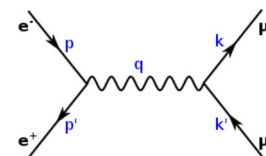
l'électrodynamique quantique⁶⁵.

L'amplitude de transition de cette réaction s'écrit⁶⁶ :

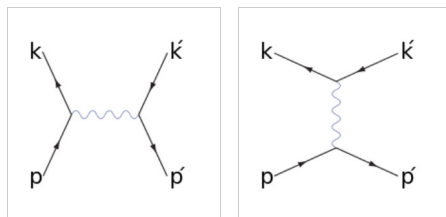
$$\mathcal{M} \sim \langle \mu^+ \mu^- | \mathbf{H}_I | \gamma \rangle \langle \gamma | \mathbf{H}_I | e^+ e^- \rangle_\mu$$

- où $|e^+ e^- \rangle$ est le facteur qui correspond aux lignes extérieures du diagramme pour le positron et l'électron,
- $\langle \mu^+ \mu^- |$ le facteur pour l'antimuon et le muon,
- \mathbf{H}_I sont les vertex (partie de l'interaction de l'opérateur hamiltonien),
- $|\gamma \rangle \langle \gamma|$, l'opérateur de la ligne interne du photon.

En utilisant les règles de Feynman, on obtient⁶⁷ :



Annihilation d'une paire électron-positron qui donne une paire muon-antimuon, où \mathbf{p} , \mathbf{p}' , \mathbf{q} , \mathbf{k} et \mathbf{k}' sont les quadrivecteurs des particules.



annihilation (canal s) diffusion (canal t)

Les canaux *s* et *t* sont définis par les variables de Mandelstam⁶⁸. Grâce aux règles de Feynman, on écrit pour chaque diagramme (et donc chaque canal) un élément de matrice [réf. souhaitée] :

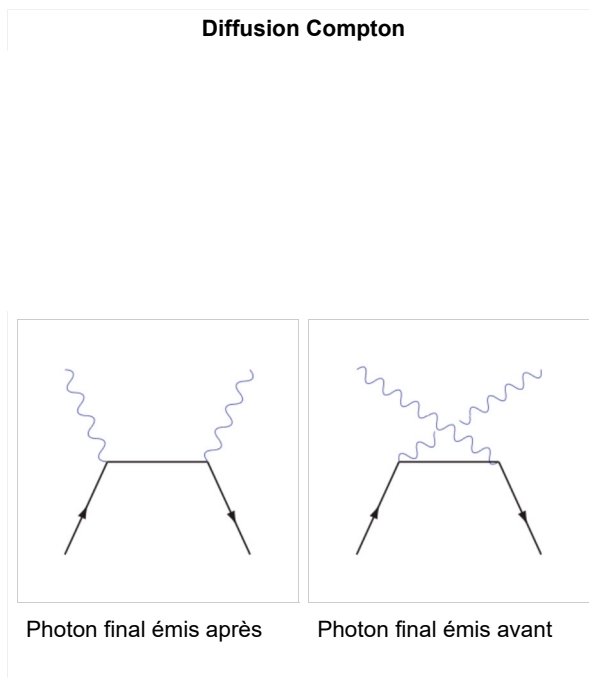
$$\mathcal{M}_s = \bar{v}(k)ie\gamma^\mu u(p) \frac{ig_{\mu\nu}}{(k+p)^2} \bar{u}(p')ie\gamma^\nu v(k')$$

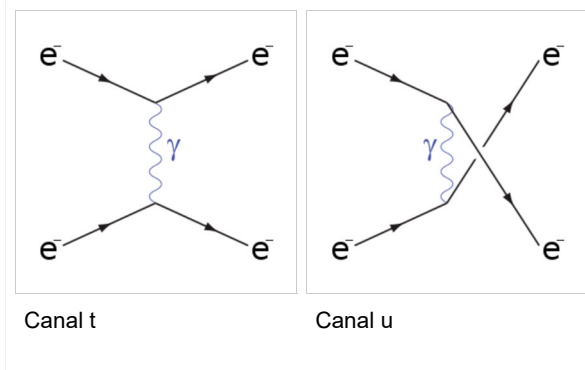
$$\mathcal{M}_t = \bar{v}(k)ie\gamma^\rho v(k') \frac{ig_{\rho\sigma}}{(k'-k)^2} \bar{u}(p')ie\gamma^\sigma u(p)$$

- où k et k' sont les quadri-moments du positron, p et p' ceux de l'électron,
- v et \bar{v} les spineurs du positron, u et \bar{u} ceux de l'électron,
- γ^μ , γ^ν , γ^ρ et γ^σ des matrices de Dirac.

Effet Compton

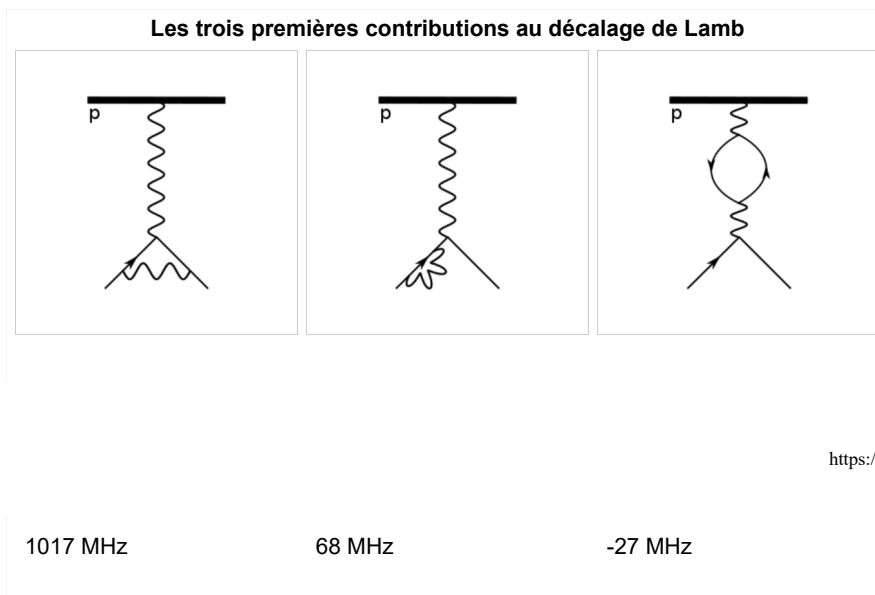
L'effet Compton est la diffusion inélastique d'un photon par la matière. Les diagrammes suivants rendent compte des deux ordres possibles de l'absorption et de l'émission des photons⁶⁹ :





Décalage de Lamb

Le décalage de Lamb représente l'écart entre les deux niveaux de structure fine de l'atome d'hydrogène notés $2S_{1/2}$ et $2P_{1/2}$. Les trois premières contributions à ce décalage sont représentées par les diagrammes suivants, donnant dans l'ordre la renormalisation de la masse de l'électron, son moment magnétique anomal et la polarisation du vide, totalisant une différence de 1 058 MHz par opposition à l'équation de Dirac qui leur donne le même niveau⁷¹ :

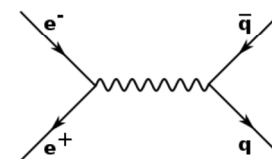
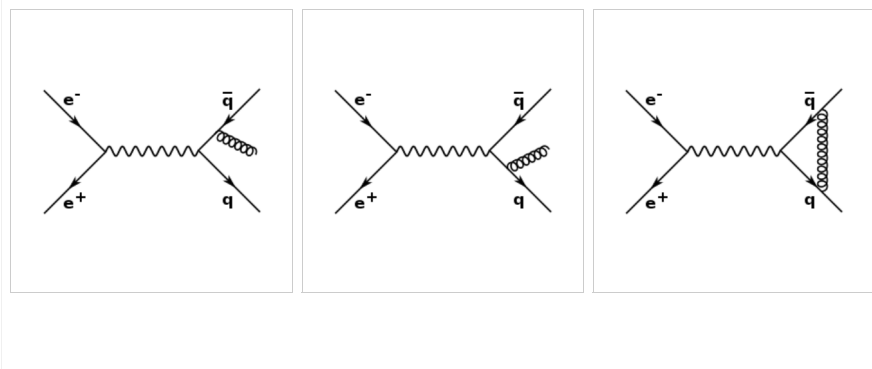


Fluctuation quantique du vide

Les photons émis puis réabsorbés par le même électron sont des photons virtuels dus à l'interaction avec les fluctuations quantiques du vide. Les diagrammes suivants représentent aussi la self-énergie de l'électron à plusieurs boucles⁷³ :



Interaction de l'électron avec les fluctuations quantiques du



Annihilation électron-positron et création de quarks.

Critiques et autres théories

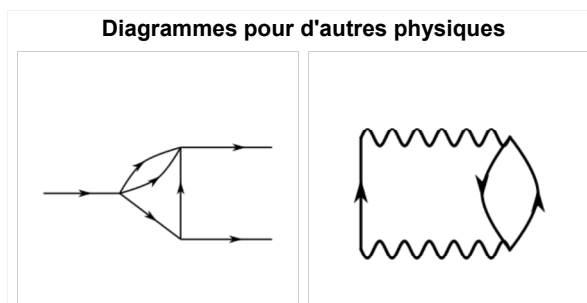
Les diagrammes de Feynman ont permis de calculer les amplitudes de diffusion pendant plus de 60 ans, mais malgré leur efficacité, ils ne permettent pas de traiter des réactions compliquées même avec les ordinateurs les plus récents : le nombre de termes nécessaires à l'ordre de correction supérieur augmente exponentiellement. Une nouvelle technique, dite « méthode d'unitarité » permet de dépasser ce problème⁷⁵. En chromodynamique quantique, l'analyse de la diffusion de deux gluons qui en donne trois était trop complexe avec les diagrammes. Cette nouvelle méthode donne une formule simple qui tient sur une page et permet de comprendre la réaction à l'aide du principe d'unitarité, principe implicite dans les diagrammes de Feynman car masqué par la complexité des calculs. Bien qu'utilisé dans les années 1960, ce principe a été remis en avant par cette nouvelle technique. Elle évite d'avoir recours aux particules virtuelles, la source même de la complexité des diagrammes : quand la méthode de Feynman ajoute tous les diagrammes possibles d'une réaction, y compris celles qui semblent impossibles, alors même qu'elles finissent par s'annuler, la méthode d'unitarité ne considère que les réactions utiles⁷⁶.

Utilisation en dehors des interactions élémentaires

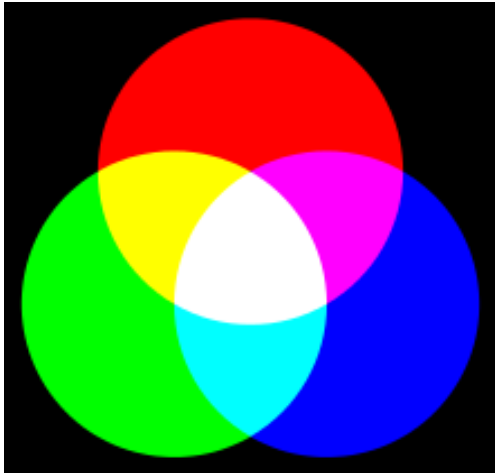
Le formalisme des diagrammes de Feynman, que ce soit dans leur représentation graphique ou dans les idées mathématiques qui les sous-tendent, a été repris dans de nombreux domaines de la physique.

En physique nucléaire, les processus sont proches de ceux des interactions élémentaires. Les équations et les mesures sont analogues, puisque l'on calcule aussi des amplitudes pour vérifier les sections efficaces⁷⁷.

De même, en physique de la matière condensée dont le sous-domaine le plus important est la physique du solide, la description théorique utilise des entités appelées quasiparticules qui peuvent être décrites par des fonctions de Green et donc des propagateurs comme pour les particules élémentaires. Ces interactions sont ainsi calculées avec des diagrammes de Feynman⁷⁸.



SYNTHESE ADDITIVE ET SYNTHESE SOUSTRACTIVE



La **synthèse additive** des couleurs est le procédé consistant à combiner les lumières de plusieurs sources colorées dans le but d'obtenir une lumière colorée quelconque dans un gamut déterminé.

La synthèse additive utilise généralement trois lumières colorées : une rouge, une verte et une bleue (RVB ou RGB en anglais pour *red, green, blue*). L'addition de ces trois lumières colorées en proportions convenables donne la lumière blanche. L'absence de lumière donne du noir.

Les écrans et les projecteurs de télévision et d'ordinateur utilisent le procédé de la synthèse additive. Ils ne dépendent pas d'un éclairage extérieur. La photographie argentique en couleurs¹ et l'impression en couleurs utilisent un procédé appelé synthèse soustractive car ses colorants absorbent en partie la lumière d'un illuminant dont ils dépendent pour le rendu des couleurs.



La **synthèse soustractive** des couleurs est le procédé consistant à combiner l'absorption d'au moins trois colorants pour obtenir toutes celles d'une gamme.

Le terme *soustractif* vient du fait qu'un objet coloré absorbe une partie de la lumière incidente. Il soustrait donc une partie du spectre lumineux de celle-ci. En retirant successivement certaines parties du spectre, les colorants de la synthèse soustractive en laissent d'autres prépondérantes. Celles-ci déterminent la couleur résultante. Le terme de soustraction s'utilise habituellement en opposition à la synthèse additive ; il est cependant trompeur, car les primaires n'effectuent pas, sur la lumière de l'éclairant, une soustraction, mais une multiplication, différente pour chaque partie du spectre, par un nombre compris entre 0 et 1.

La photographie argentique en couleurs et l'impression en couleurs utilisent des procédés de synthèse soustractive.

Les trois colorants généralement utilisés pour la synthèse soustractive sont un cyan, un jaune et un magenta, dont le spectre d'absorption doit convenir au procédé et dont la couleur exacte peut varier.

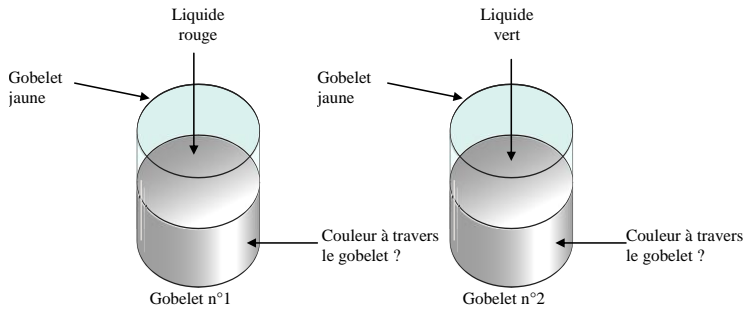


COMMENT PRODUIT-ON DES IMAGES COLORÉES SUR UNE AFFICHE ?



Un local est une fabrique de gobelets en plastique transparent de couleurs différentes. Pour la réalisation d'une plaquette publicitaire, on remplit les gobelets avec des liquides différents.

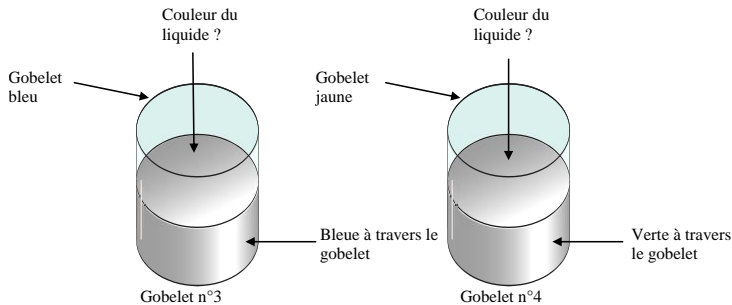
1) Pour chacun des gobelets ci-dessous, **cocher**, la case correspondant à la couleur de la boisson vue à travers le plastique jouant le rôle de filtre



Gobelet 1		Gobelet 2	
<input type="checkbox"/>	Noire	<input type="checkbox"/>	Vert
<input type="checkbox"/>	Rouge	<input type="checkbox"/>	Bleu
<input type="checkbox"/>	Orange	<input type="checkbox"/>	Jaune

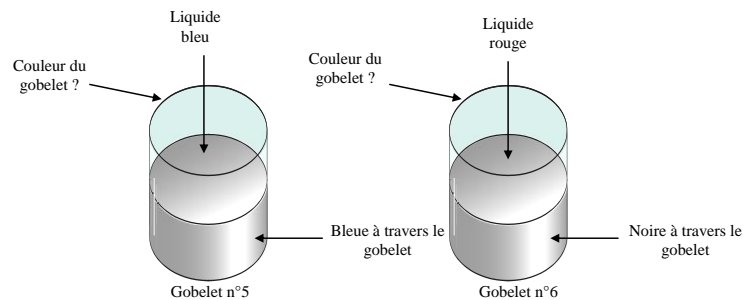
2) **Justifier** la réponse pour le gobelet n°1, en précisant la nature (additive ou soustractive) de la synthèse.

3) Pour chacun des gobelets ci-dessous, **cocher** la case correspondant à la couleur de la boisson vue à travers le plastique jouant le rôle de filtre.



Gobelet 3		Gobelet 4	
<input type="checkbox"/>	Magenta	<input type="checkbox"/>	Bleu
<input type="checkbox"/>	Vert	<input type="checkbox"/>	Jaune
<input type="checkbox"/>	Jaune	<input type="checkbox"/>	Vert

4) Pour chacun des gobelets ci-dessous, **cocher**, la case correspondant à la couleur de la boisson initialement versée.



Gobelet 5		Gobelet 6	
<input type="checkbox"/>	Vert	<input type="checkbox"/>	Rouge
<input type="checkbox"/>	Cyan	<input type="checkbox"/>	Jaune
<input type="checkbox"/>	Jaune	<input type="checkbox"/>	Vert

(D'après sujet de BEP Secteur 3 DOM – TOM Session 2007)

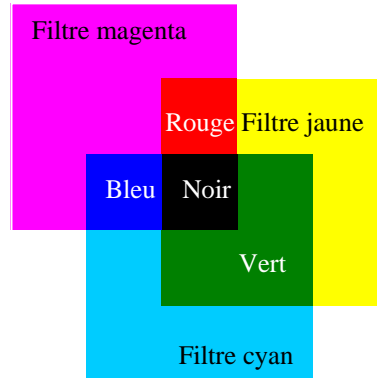


COMMENT PRODUIT-ON DES IMAGES COLORÉES SUR UNE AFFICHE ?

I) Synthèse soustractive des couleurs

On peut supprimer une radiation de la lumière blanche en la faisant passer au travers d'un **filtre**. Un filtre d'une couleur donné absorbe la lumière correspondant à sa couleur complémentaire.

Magenta + Jaune → Rouge
 Jaune + Cyan → Vert
 Magenta + Cyan → Bleu
 Magenta + Jaune + Cyan → Noir
 (absence de lumière)



Application de la synthèse soustractive : la synthèse soustractive est utilisée en imprimerie. On utilise 4 encres différentes : jaune, magenta, cyan et noire. La juxtaposition de ces 4 encres (le noir ne sert qu'à donner plus de contraste) conduit à l'image finale.



La feuille, sur laquelle est représentée cette photo, est imprimée quatre fois de suite.

II) Couleur d'un objet

Un corps éclairé par de la lumière blanche (contenant toutes les longueurs d'onde du visible) paraît :

- *noir*, s'il absorbe toutes les longueurs d'onde de la lumière incidente ;
- *blanc*, s'il n'absorbe aucune de ces longueurs d'onde ;
- *gris*, s'il absorbe la même proportion de toutes les longueurs d'onde de la lumière incidente ;
- *coloré*, s'il absorbe certaines longueurs d'ondes plus que d'autres.

