

Effets non-linéaires en QCD à haute énergie et haute densité

Théorie, Modèles et Tests Expérimentaux
S. Wallon
Laboratoire de Physique Théorique, Orsay

QCD

La **chromodynamique quantique (QCD)** est LA théorie de l'interaction forte, une des quatre interactions élémentaires de l'univers

- ▶ c'est une théorie des champs quantiques relativiste du type **Yang-Mills** (avec un groupe de jauge $SU(3)$), qui décrit l'interaction entre **quarks**, dont la charge forte est appelée "**couleur**" (3 valeurs possibles), transmise par les **gluons** (qui possèdent 8 couleurs possibles et interagissent entr'eux)

- ▶ les quarks sont **confinés** dans les hadrons :

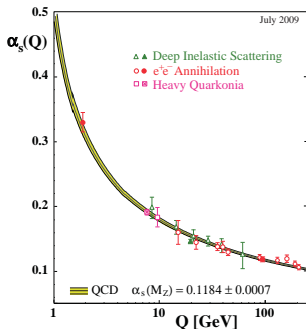
- ▶ **mésons** ($\pi, \eta, f_0, \rho, \omega \dots$)

$$|q\bar{q}\rangle + |q\bar{q}g\rangle + |qqq\bar{q}\rangle + \dots$$

- ▶ **baryons** ($p, n, N, \Delta \dots$)

$$|qqq\rangle + |qqqg\rangle + |qqq\bar{q}\rangle + \dots$$

- ▶ contrairement à l'électrodynamique, l'interaction forte augmente avec la distance, ou de façon équivalente diminue lorsque l'énergie augmente : ce phénomène est appelé **liberté asymptotique**

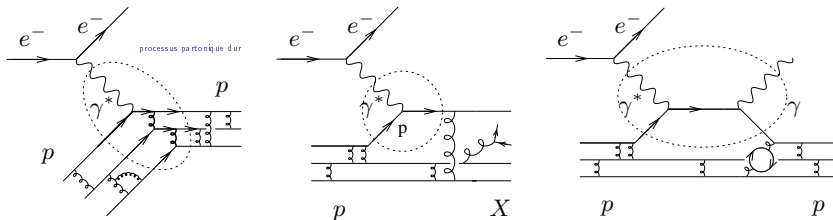


couplage $\alpha_s(Q) \ll 1$ pour $Q \gg \Lambda_{\text{QCD}} \simeq 200 \text{ MeV}$

Processus durs en QCD

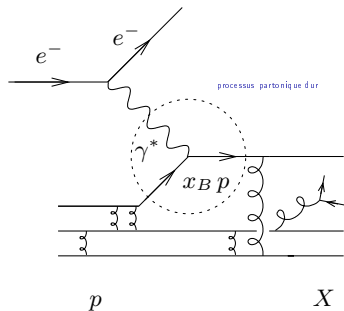
Tout processus dominé par des phénomènes à très courte distance ($d \ll 1 \text{ fm}$) peut être étudié **perturbativement** : $\alpha_s \ll 1$

- ▶ ceci est justifié si le processus est gouverné par une **échelle dure** :
 - ▶ virtualité de la sonde électromagnétique
 - dans la diffusion **élastique** $e^\pm p \rightarrow e^\pm p$
 - dans la **diffusion profondément inélastique (DIS)** $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$
 - dans la **diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS)** $e^\pm p \rightarrow e^\pm p \gamma$
 - ▶ énergie totale dans le centre de masse dans **l'annihilation** $e^+e^- \rightarrow X$
 - ▶ énergie échangée dans la voie t en photoproduction $\gamma p \rightarrow V p$ d'un méson vecteur V, \dots
- ▶ un traitement précis repose sur les **théorèmes de factorisation**
- ▶ l'amplitude de diffusion est décrite comme une convolution de l'amplitude du processus à courte distance (au niveau *partonique* : quarks, gluons) et du contenu non-perturbatif du hadron



Accéder au contenu perturbatif du proton

exemple : la diffusion profondément inélastique proton-électron



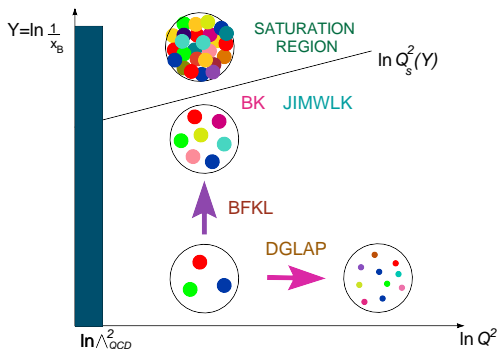
$$s_{\gamma^* p} = (q_{\gamma^*} + p_p)^2 = 4 E_{\text{c.m.}}^2$$

$$Q^2 \equiv -q_{\gamma^*}^2 > 0$$

$$x_B = \frac{Q^2}{2 p_p \cdot q_{\gamma^*}} \simeq \frac{Q^2}{s_{\gamma^* p}}$$

- ▶ x_B = fraction d'impulsion du proton emportée par le quark
- ▶ $1/Q$ = résolution transverse de la sonde photonique $\ll 1/\Lambda_{QCD}$

Les régimes gouvernant le contenu perturbatif du proton



- ▶ régime "usuel" : x_B modéré ($x_B \gtrsim .01$) : évolution gouvernée par le groupe de renormalisation de QCD (équations Dokshitzer, Gribov, Lipatov, Altarelli, Parisi)

$$\sum_n (\alpha_s \ln Q^2)^n \quad + \quad \alpha_s \sum_n (\alpha_s \ln Q^2)^n + \dots$$

LLQ NLLQ

- ▶ régime de Regge $x_B \sim Q^2/s_{\gamma^*p} \rightarrow 0$ perturbatif (échelle dure Q^2)

$s \rightarrow \infty$

Un régime particulier de QCD : la limite de **Regge perturbative** $s \rightarrow \infty$

diffusion de deux hadrons h_1 et h_2 :

- ▶ \sqrt{s} ($= E_1 + E_2$ dans le système du centre de masse) \gg autres échelles (masses, impulsion transférées, ...)
- ▶ autres échelles comparables

régime $\alpha_s \ln s \sim 1 \Rightarrow$ sous-série dominante :

$$\mathcal{A} = \underbrace{\text{diagramme 1}}_{\sim s} + \left(\underbrace{\text{diagramme 2}}_{\sim s} + \underbrace{\text{diagramme 3}}_{\sim s} + \dots \right) + \left(\underbrace{\text{diagramme 4}}_{\sim s} + \dots \right) + \dots$$

The diagrams are: 1. Two cyan ovals connected by a vertical wavy line. 2. Two cyan ovals connected by a vertical wavy line, with a horizontal wavy line connecting the two vertical lines. 3. Two cyan ovals connected by a vertical wavy line, with a circular loop on the right vertical line. 4. Two cyan ovals connected by a vertical wavy line, with a vertical wavy line connecting the two vertical lines.

$$\Rightarrow \sigma_{tot}^{h_1 h_2 \rightarrow tout} = \frac{1}{s} \text{Im} \mathcal{A} \sim s^{\alpha_{\mathbb{P}}(0)-1}$$

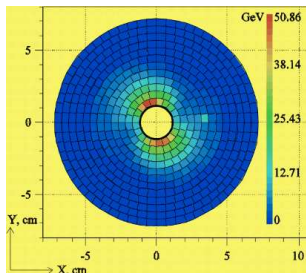
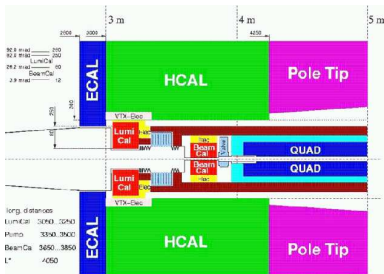
avec $\alpha_{\mathbb{P}}(0) - 1 = C \alpha_s$ ($C > 0$) **Pomeron** Balitsky, Fadin, Kuraev, Lipatov

- ▶ Ce résultat viole l'**unitarité** de la matrice S de QCD ($S S^\dagger = S^\dagger S = 1$ i.e. $\sum \text{Prob.} = 1$)
- ▶ Jusqu'où est-ce valable, et comment améliorer ce résultat ?
- ▶ Peut-on tester cela expérimentalement ?

Un exemple de test réaliste du Pomeron : $\gamma^{(*)}\gamma^{(*)} \rightarrow \rho\rho$
 comme sous-processus de $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\rho\rho$

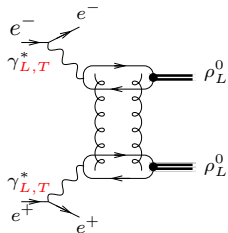
Un tel test sur un processus **exclusif** rare serait possible au futur Collisionneur Linéaire International (ILC) e^+e^-

- ▶ ILC devrait fournir un **très grand** \sqrt{s} (= 500 GeV) et une **très grande luminosité** ($\simeq 125 \text{ fb}^{-1}/\text{an}$)
- ▶ les détecteurs prévus devraient couvrir les régions “vers l’avant” très proches du faisceau (directions des e^+ et e^- sortant à grand s)

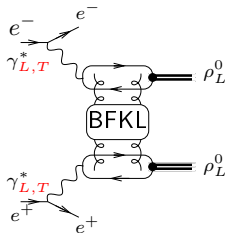


bonne efficacité de détection pour des e^\pm sortant tels que $E_e > 100 \text{ GeV}$ et $\theta > 4 \text{ mrad}$

Effets de QCD dans la limite de Regge sur $\gamma^{(*)}\gamma^{(*)} \rightarrow \rho\rho$

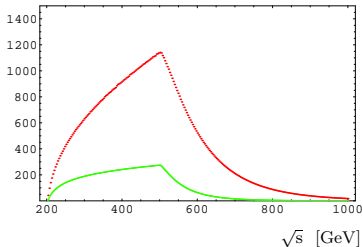


$\simeq 4.10^3$ événements/an



$\simeq 2.10^4$ événements/an

$\frac{d\sigma^{tmin}}{dt} (fb/GeV^2)$



preuve de faisabilité :

B. Pire, L. Szymanowski and S. W.
Eur.Phys.J.C44 (2005) 545

preuve d'une amplification BFKL :

R. Enberg, B. Pire, L. Szymanowski and S. W.
Eur.Phys.J.C45 (2006) 759

étude détaillée de effets de polarisation des γ^*
et taux d'événements :

M. Segond, L. Szymanowski and S. W.
Eur. Phys. J. C 52 (2007) 93

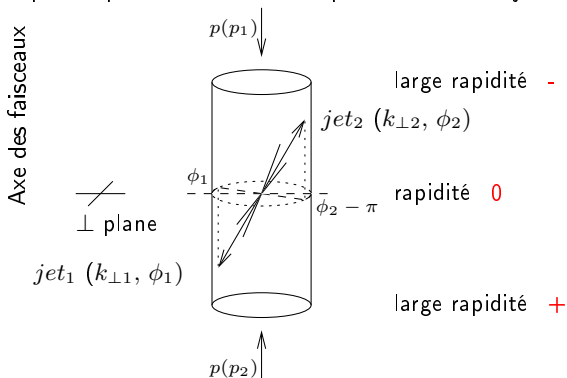
Thèse de M. Segond (2007)

Tests de QCD dans la limite de Regge dans les collisionneurs hadroniques

- ▶ le photon virtuel dur γ^* initiait un processus perturbatif dans le cas précédent
- ▶ p, \bar{p} sont des objets confinés
- ▶ le photon virtuel dur γ^* peut être remplacé par un photon réel γ si p est vu comme une source de photons : événements dits “ultrapériphériques” : légitime pour des distances entre les deux hadrons qui entrent en collision bien plus grandes que la portée typique de l’interaction forte (quelques fm)
- ▶ l’échelle dure peut être donnée :
 - ▶ par le grand transfert d’impulsion dans la cible (t large)
 - ▶ par la masse de l’état produit (exemple : état lié J/Ψ de quarks $c\bar{c}$)
 - ▶ par la grande impulsion des jets de quarks produits

Jets Mueller Navelet

- ▶ Soient deux jets (paquet de hadrons dans un cône étroit) **séparés par une grande rapidité**, i.e. chacun d'eux vole quasiment dans la direction du proton incident, et avec une impulsion transverse très voisine
- ▶ Dans un traitement purement colinéaire, ces deux jets devraient être émis **dans des directions opposées** : $\Delta\phi - \pi = 0$ ($\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 =$ angle azimutal relatif) et $k_{\perp 1} = k_{\perp 2}$:
pas d'espace des phases pour une émission de partons entre ces jets



Jets Mueller Navelet à la BFKL

- ▶ resommation à la **BFKL** :

$$\sum_n (\alpha_s \ln s)^n \quad + \quad \alpha_s \sum_n (\alpha_s \ln s)^n \quad + \quad \dots$$

LLx NLLx

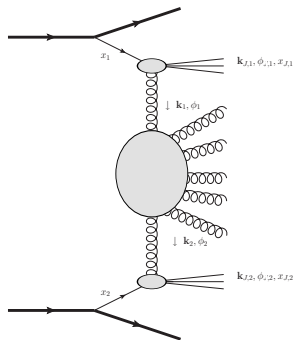
Emission possible entre ces deux jets

→ **décorrelation** importante
entre les angles azimutaux relatifs

LLx : incompatible

avec les données $p\bar{p}$ au **Tevatron**

- ▶ **DGLAP** NLLQ : description correcte des données de **Tevatron**
- ▶ **Effet des corrections NLLx à BFKL ?**
 - ▶ jusqu'à présent, les corrections NLLx étaient prises en compte seulement pour l'état \mathbb{P} omeron échangé, et pas pour les fonctions de vertex des jets
 - ▶ il était communément admis que ces corrections étaient peu importantes

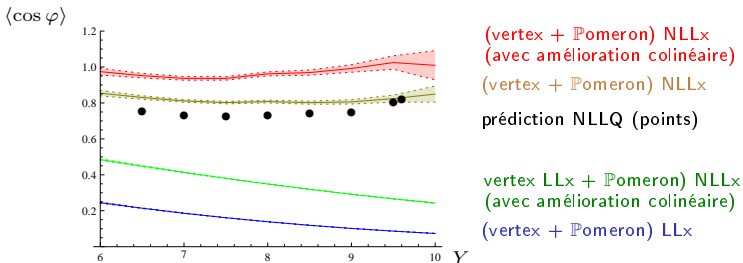


Jets Mueller Navelet à la BFKL : traitement complet NLLx

Nous avons effectué la première étude complète NLLx

D. Colferai, L. Szymanowski, F. Schwennsen et S. W., soumis a JHEP

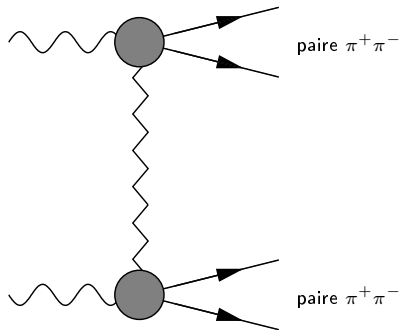
- ▶ les corrections NLLx aux vertex des jets sont très importantes, du même ordre que celles pour le \mathbb{P} omeron échangé
- ▶ les prédictions sont maintenant proches de celles basées sur NLLQ
- ▶ l'étude des jets Mueller Navelet ne permettra donc sans doute pas de mettre en évidence les effets typique de QCD dans la limite de Regge



Recherche l'Odderon désespérément...

- ▶ **Conjugaison** de charge C : échange une particule en son antiparticule.
Exemple : $e^- \leftrightarrow e^+$, $q \leftrightarrow \bar{q}$
Un état lié possède un nombre quantique intrinsèque décrivant sa transformation sous C -parité. Exemple : le méson ρ est de C -parité -1
- ▶ Deux échanges possibles à haute énergie entre deux hadrons :
 - ▶ $C = +1$: **Pomeron**, décrit en QCD perturbative par l'équation **BFKL** (état lié à 2 gluons ou plus)
 - ▶ $C = -1$: **Odderon**, décrit en QCD perturbative par l'équation **BJKP** (état lié à 3 gluons ou plus)
- ▶ Seule preuve d'existence de l'Odderon : σ_{tot}^{pp} versus $\sigma_{\text{tot}}^{p\bar{p}}$ aux **ISR (CERN)**
- ▶ Pas de preuve expérimentale d'existence de l'Odderon perturbatif de QCD
- ▶ $|\mathcal{A}_0| \ll |\mathcal{A}_P| \Rightarrow$ deux stratégies en QCD
 - ▶ **processus** pour lesquels l'échange d'un Pomeron est impossible par C -parité : production exclusive de $\eta, \eta_c, f_2, a_2, \dots$ dans ep ; $\mathcal{A}^{\gamma\gamma \rightarrow \eta_c \eta_c} \sim |\mathcal{A}_0|^2$
production exclusive de $J/\Psi, \Upsilon$ dans pp (fusion $\mathbb{P}\mathbb{O}$, avec $\mathbb{P}\mathbb{P}$ impossible)
 - ▶ **observables** sensibles à l'**interférence** entre \mathbb{P} et \mathbb{O} :
 $\text{Re}[\mathcal{A}_P \mathcal{A}_0^*] \Rightarrow$ observable **linéaire** en \mathcal{A}_0
- ▶ Le couplage de \mathbb{P}/\mathbb{O} au proton n'est pas calculable perturbativement
 \Rightarrow diffusions $\gamma^{(*)}\gamma^{(*)}$: **processus dur**

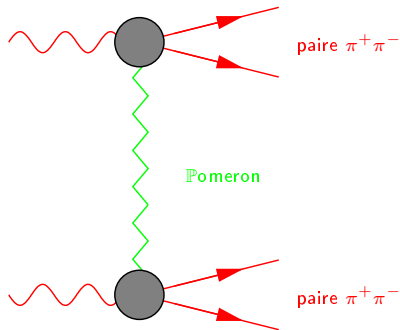
Recherche de l'Odderon en collision ultrapériphérique :
Production $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$



- ▶ C -parité du photon = +
- ▶ Production exclusive de deux paires de mésons $\pi^+ \pi^-$
⇒ échange d'un état neutre de couleur entr'eux
- ▶ C -parité de la paire $\pi^+ \pi^-$ non fixée
⇒ deux possibilités

B. Pire, F. Schwennsen, L. Szymanowski and S. W.
Phys. Rev. D **78** (2008) 094009

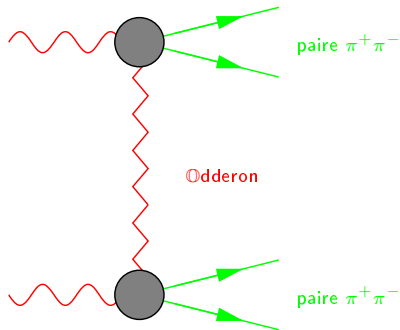
Recherche de l'Odderon en collision ultrapériphérique : Production $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$



- ▶ C -parité du photon = +
- ▶ Production exclusive de deux paires de mésons $\pi^+ \pi^-$
⇒ échange d'un état neutre de couleur entr'eux $C = +$
- ▶ C -parité de la paire $\pi^+ \pi^-$ -

B. Pire, F. Schwennsen, L. Szymanowski and S. W.
Phys. Rev. D **78** (2008) 094009

Recherche de l'Odderon en collision ultrapériphérique : Production $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$



- ▶ C -parité du photon = +
- ▶ Production exclusive de deux paires de mésons $\pi^+ \pi^-$
⇒ échange d'un état neutre de couleur entr'eux $C = -$
- ▶ C -parité de la paire $\pi^+ \pi^-$ +

B. Pire, F. Schwennsen, L. Szymanowski and S. W.
Phys. Rev. D **78** (2008) 094009

Effets de polarisation dans $\gamma^* P \rightarrow \rho P$ à HERA

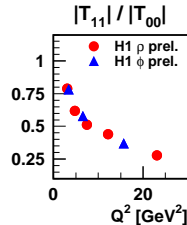
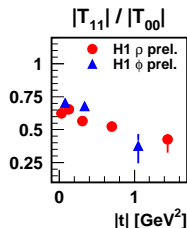
HERA (DESY, Hambourg) : premier et seul collisionneur $e^\pm p$ (1992-2007)

- Données expérimentales très précises sur la matrice de densité de spin (i.e. corrélations entre polarisation du γ^* et du ρ)
rem. : le ρ et le γ^* virtuel possèdent 3 polarisations : 2 transverses et 1 longitudinale

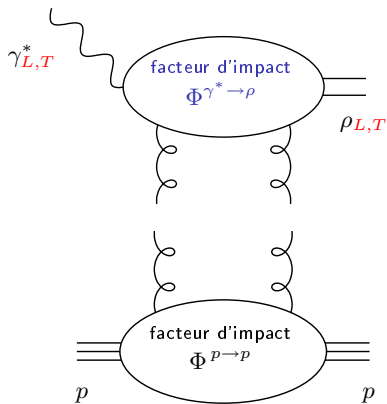
- à $t = t_{min}$ on distingue expérimentalement

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_L^* \rightarrow \rho_L : \text{domine ("twist 2" : amplitude } |\mathcal{A}| \sim \frac{1}{Q}) \\ \gamma_T^* \rightarrow \rho_T : \text{visible ("twist 3" : amplitude } |\mathcal{A}| \sim \frac{1}{Q^2}) \end{array} \right.$$

- Comment calculer l'amplitude de transition $\gamma_T^* \rightarrow \rho_T$ à partir des premiers principes ?



Production exclusive de méson vecteur :
Premier calcul cohérent au **twist 3** jamais réalisé



Calcul du facteur d'impact $\Phi^{\gamma^* \rightarrow \rho}$ au twist 3 :

I. V. Anikin, D. Y. Ivanov, B. Pire, L. Szymanowski and S. W.
Phys. Lett. Phys. Lett. B 688 :154-167, 2010 B ; Nucl. Phys. B 828 :1-68, 2010.

Directions de recherche poursuivies

- ▶ Dans le cadre de l'**ANR Dense QCD**, de nombreux travaux phénoménologiques et formels ont été menés, afin de comprendre et tester la dynamique de l'interaction forte dans le régime de **Regge** des **très hautes énergies** pour lesquelles le nombre de constituants élémentaires (quarks, gluons) mis en jeu est très grands, tout en restant accessible aux **méthodes perturbatives** de la théorie quantique des champs
- ▶ Ce travail s'inscrit également dans la suite de progrès qui ont eu lieu depuis une dizaine d'année dans l'étude et la compréhension des **processus exclusifs durs** (en liaison avec de nouvelles possibilités expérimentales : grandes énergie et luminosités)

Résultats

- ▶ Nous avons effectué la première étude complète à l'ordre des logarithmes sous-dominants (NLL BFKL) d'un processus actuellement testable expérimentalement (jets Mueller-Navelet au LHC)
- ▶ La combinaison des techniques spécifiques aux processus exclusifs et aux processus dans la limite de Regge perturbative est un point fort de notre activité, quasi-unique sur le plan international
 - ▶ Ces techniques ont permis de proposer de nouvelles observables afin de mettre en évidence et tester les états liés spécifiques de QCD dans la limite de Regge (Pomeron et Odderon)
 - ▶ Un de nos résultats importants a été de développer la première approche cohérente pour la description des processus exclusifs à haute énergie au-delà des puissances dominantes dans l'échelle dure
Cette approche aura également des conséquences sur la compréhension des processus exclusifs durs à plus basse énergie
- ▶ Des liens ont été établis avec des problèmes de réaction-diffusion en physique statistique, là aussi suivant un angle d'attaque très original qui permet une fertilisation croisée entre la physique des particules et la physique statistique hors de l'équilibre

Quelques chiffres sur la durée du contrat ANR

- ▶ Deux permanents : S. Wallon (MdC, LPT Orsay), S. Munier (CR1, CPhT-X, Palaiseau)
- ▶ Deux post-docs : F. Schwennsen, G. Chirilli
- ▶ Trois étudiants en thèse (co-direction de S. Wallon) : M. Segond, M. El Beiyad, A. Besse
- ▶ Nombreuses collaborations nationales :
E. Brunet (LPS, Paris), B. Derrida (LPS, Paris), C. Marquet (IPhT, Saclay et CERN, Genève), B. Pire (CPhT-X, Palaiseau), C. Roiesnel (CPhT-X, Palaiseau), G. P. Salam (LPTHE, Paris et CERN, Genève), G. Soyez (IPhT, Saclay)
- ▶ Nombreuses collaborations internationales :
I. Anikin (JINR, Dubna), M. Ciafaloni (INFN et Université de Florence, Italie), D. Colferai (INFN et Université de Florence, Italie), C. Ewerz (ITP, Heidelberg et EMMI, Darmstadt, Allemagne), D. Yu. Ivanov (Novosibirsk, Russie), A. H. Mueller (Université de Columbia, NY, USA), A. Shuvaev (PNPI, Gatchina, Russie), L. Szymanowski (SINS, Varsovie)
- ▶ 15 publications dans des revues internationales à comité de lecture
- ▶ 37 compte-rendus de conférences internationales avec comité de lecture

Et après ?

- ▶ Projet ANR Blanc “**FUTUREX**” déposé :
Théorie, phénoménologie et prospective des processus exclusifs et semi-exclusifs durs en chromodynamique quantique
- ▶ Mise en commun des expertises de 3 laboratoires du Plateau de Saclay :
 - ▶ Laboratoire de Physique Théorique d'Orsay (LPT) : 2 permanents impliqués
Benoit Blossier, Samuel Wallon (porteur)
 - ▶ Centre de Physique Théorique de l'Ecole Polytechnique (CPHT) :
2 permanents impliqués
Bernard Pire, Claude Roiesnel
 - ▶ Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO) : 5 permanents impliqués
Jean-Philippe Lansberg, Samuel Friot, Jacques Van de Wiele, Michel Guidal, Saro Ong
- ▶ Expertises croisées, de niveau international pour chacune d'elle :
 - ▶ Méthodes perturbatives en QCD
 - ▶ Méthodes non-perturbatives en QCD : simulations numériques en QCD sur réseau
 - ▶ Phénoménologie des processus exclusifs et semi-exclusifs, en liaison avec les expériences JLab (Virginie), COMPASS (CERN), PANDA (GSI), futurs collisionneurs electron-ion
- ▶ Objectifs :
 - ▶ Structure tridimensionnelle en quark et gluons des nucléons
 - ▶ Contenu mésonique des baryons
 - ▶ Etude des états hybrides mésoniques et baryoniques (exemple : états $q\bar{q}g$)