

L'expérience DØ

G. Sajot, Y. Arnaud, F. Chevallier (th.), S. Crépé-Renaudin, A.-M. Magnan (th.), B. Martin dit Latour (th.), J. Stark, C. Yu (vis.).

The DØ experiment is a general purpose experiment located at the Fermilab's high energy accelerator, the Tevatron collider. Since the beginning of 2000, the experiment has been recording proton-antiproton collisions at 1.96 TeV and at a rate 10 times higher than what was achieved during the first phase of running which lead to the discovery of the top quark in 1995. The Tevatron thus presently offers a unique opportunity to search for new physics signs at high energies. In this context, the LPSC group has been involved in the search for supersymmetry and top quark physics. These activities have been driven by a significant implication in technical tasks devoted to the understanding and the improvement of the calorimeter performance, the design of software tools to identify electromagnetic objects, and the improvement of simulation tools.

L'expérience DØ (Figure 1) est l'une des deux expériences de physique des particules installées sur le Tevatron, le collisionneur du laboratoire Fermi près de Chicago (USA). DØ est une collaboration internationale d'environ 600 physiciens répartis dans 83 institutions appartenant à 19 pays. Le Tevatron produit des collisions entre des faisceaux de protons et d'anti-protons à une énergie dans le centre de masse de 1,96 TeV, et est de fait le collisionneur le plus puissant au monde. C'est au Tevatron qu'a été mis en évidence le quark le plus lourd, le top, par les collaborations DØ et CDF en 1995.

Depuis le démarrage de sa deuxième phase de fonctionnement (Run II), le Tevatron a accumulé un nombre impressionnant de collisions: fin octobre 2005 l'expérience DØ a ainsi passé le seuil de 1 fb^{-1} de données enregistrées avec une luminosité instantanée de $1,5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Cette prise de données se poursuivra jusqu'au printemps 2006, période à laquelle le Tevatron s'arrêtera pour permettre une amélioration du complexe d'accélération ainsi que des expériences.

Avec une telle luminosité et une telle énergie, les expériences du Tevatron sont actuellement un lieu idéal pour étudier les particules élémentaires et mettre à l'épreuve avec une grande précision le Modèle Standard (MS) qui les décrit ainsi que leurs interactions. Ainsi le groupe de Grenoble est impliqué dans l'étude du quark top, le plus lourd des quarks et le dernier à avoir été mis en évidence. Une étude débute également sur la mesure de la masse du W, boson de l'interaction électrofaible. Nous recherchons aussi des particules supersymétriques, prédites par des théories qui permettent de combler certains points faibles du Modèle Standard.

Cependant avant de pouvoir étudier la physique des particules élémentaires, il faut avant tout comprendre et maîtriser les détecteurs qui ont été construits dans ce but, mais aussi construire les outils logiciels nécessaires à l'exploitation des centaines de téraoctets de données qu'ils produisent. C'est pourquoi ce rapport commence par décrire les contributions techniques du groupe avant de détailler les analyses de physique en cours.

◆ Contributions techniques

Les contributions techniques du groupe sont centrées sur la calorimétrie. Le calorimètre de DØ est un détecteur à échantillonnage (argon liquide pour la partie active et uranium, cuivre ou acier pour la partie « absorbeur ») qui permet de reconstruire les particules électromagnétiques: électrons, photons, mais aussi les jets de particules issus de la production des quarks. Les contributions du groupe vont du suivi et de l'amélioration des performances du calorimètre, à la mise en place d'algorithmes d'identification d'objets particuliers tels que les jets issus des quarks b.



Figure 1: L'expérience DØ: vue générale du détecteur (au premier plan: les scintillateurs des détecteurs de muons) lors de sa mise en place en vue du Run II. Le détecteur mesure environ 10 m de hauteur.

Calorimétrie et reconstruction des objets électromagnétiques

Pour le Run II, DØ utilise les mêmes calorimètres que pour le Run I. Cependant, l'électronique de lecture a été partiellement repensée pour tenir compte du taux d'événements beaucoup plus élevé. Les performances des calorimètres étaient excellentes au Run I. Le groupe de Grenoble a joué un rôle important dans la remise au point des calorimètres dans l'environnement plus complexe du Run II.

▪ *Contributions à la mise au point de la nouvelle électronique de lecture*

Au début du Run II, divers problèmes avec la nouvelle électronique de lecture ont affecté la qualité des données des calorimètres. Quelques exemplaires des nouveaux circuits ont, par exemple, lu la moyenne de l'énergie dans deux cellules, au lieu de l'énergie d'une cellule donnée. D'autres exemplaires ont stocké de l'information incorrecte sur le choix événement par événement du préamplificateur. Le groupe de Grenoble a élaboré des algorithmes qui sont inclus dans le programme de reconstruction hors ligne des données, pour corriger ces erreurs de lecture. Ceci concerne environ les premiers 300 pb⁻¹ du Run II. Le groupe a également mis au point des programmes de monitoring qui mettent en évidence de tels problèmes dès qu'ils se produisent.

▪ *Étalonnage des calorimètres*

La précision mécanique de la fabrication des modules des calorimètres était adaptée pour le Run I, mais avec le temps d'intégration du signal beaucoup plus court au Run II, les imprécisions mécaniques résiduelles donnent lieu à des variations jusqu'à 20% entre les gains des différentes cellules. Ces variations limitent la précision des calorimètres dans les premières publications du Run II. Depuis, une méthode mise au point à Grenoble a été utilisée pour étalonner toutes les cellules des calorimètres de DØ avec une grande précision. La méthode est basée sur des données de collision qui sont enregistrées à l'aide d'un déclenchement dédié, développé par notre groupe. Les constantes d'étalonnage finales ont été extraites par des experts sous la direction d'un membre de notre équipe. L'intégralité des données du Run II vient d'être reconstruite en utilisant le nouvel étalonnage des calorimètres.

▪ *Correction des pertes d'énergie des électrons*

Le calorimètre ne reçoit pas toujours la totalité de l'énergie des électrons. En effet, différents facteurs géométriques comme les zones mortes entre le calorimètre central et le calorimètre avant, la présence d'espace non instrumenté entre les modules du calorimètre, la quantité de matière en amont du calorimètre, entraînent une perte d'énergie importante qui n'est pas prise en compte dans le code de reconstruction. Des corrections pour ces différents effets ont été mises au point à partir de simulation Monte-Carlo et sont utilisées par l'ensemble de la collaboration. L'accord entre données et Monte-Carlo est quantifié à l'aide d'études détaillées des échantillons $Z \rightarrow e^+e^-$ et $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$. Les événements J/Ψ sont enregistrés à l'aide d'un déclenchement dédié qui a été développé par le groupe et qui fait un usage extensif du nouveau système de déclenchement (utilisant les traces des particules chargées).

▪ *Conclusion*

Les données reconstruites avec le nouvel étalonnage sont tout juste disponibles pour l'analyse, mais les bénéfices de ce travail de fond sont déjà visibles. Auparavant, l'incertitude systématique sur l'échelle en énergie des jets était significativement plus grande qu'au Run I, ce qui était un facteur limitant dans une partie des premières publications du Run II. Les études préliminaires sur ces données permettent déjà d'atteindre une incertitude quasiment identique à celle du Run I. Une précision supérieure à celle du Run I est donc attendue pour les études finales. L'effet positif du nouvel étalonnage est également visible dans les états finals avec électrons. Ainsi, si on prend aussi en compte les améliorations de la simulation (en particulier de la matière en amont des calorimètres), les performances nécessaires à une très bonne mesure de la masse du W sont à la portée de DØ.

Étiquetage des jets de quark b avec des électrons non isolés

Une fois que le détecteur est correctement compris et étalonné, on peut utiliser des algorithmes permettant d'identifier et reconstruire des objets plus complexes comme les jets issus des quarks b. Le groupe DØ du LPSC est ainsi impliqué dans l'étiquetage des jets beaux, procédé particulièrement utile pour la recherche de processus rares et la réduction des bruits de fonds QCD notamment. Les hadrons beaux ont deux caractéristiques propres : un temps de demi-vie plus long que celui des autres quarks et un rapport d'embranchement en désintégrations semileptoniques d'environ 20%. Cette dernière propriété est mise à profit dans les « soft lepton tag », algorithmes qui recherchent la présence de leptons dans les jets hadroniques.

Le groupe a développé un « soft electron tag » qui est en cours de validation par la collaboration DØ. Cet outil permet l'identification d'électrons de faible énergie dans les jets par la coïncidence des informations provenant du calorimètre, du détecteur de traces et du détecteur de pieds de gerbe (non utilisé jusqu'alors). Cette combinaison permet seule d'améliorer suffisamment la discrimination électrons/pions. Les tests sur données réelles ont conforté l'analyse Monte-Carlo. Ainsi, sur 100 jets beaux énergétiques, 55 sont sélectionnés par l'algorithme, pour un taux de mauvais étiquetage de 6% (jets de saveurs légères identifiés comme jets de saveurs lourdes). À terme, le lot provenant de l'étiquetage des b par les électrons, non utilisé jusqu'alors, fera parti de la sélection officielle dans le cadre de la mesure des sections efficaces de production de quarks top.

◆ Activités d'analyse physique

Recherche de particules supersymétriques

La supersymétrie est une théorie dans laquelle on définit une symétrie entre les bosons (particules de spin entier) et les fermions (particules de spin demi-entier). Chaque fermion (boson) du MS aura donc un partenaire boson (fermion) supersymétrique. On définit ainsi un nombre quantique multiplicatif, la R-parité, qui permet de distinguer les particules du MS ($R_p = +1$) des particules supersymétriques ($R_p = -1$). Si on considère que ce nombre est conservé, alors les particules supersymétriques ne peuvent être produites qu'en paires à partir d'une particule standard. La particule supersymétrique la plus légère (ou LSP) est alors nécessairement stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire de l'univers. Cependant, théoriquement, rien ne justifie cette hypothèse de conservation. Dans le cas de la violation de la R-parité, la désintégration de la LSP en particules du modèle standard est alors possible et introduit trois nouveaux couplages (λ , λ' , et λ'') entre les sfermions, partenaires supersymétriques des fermions du Modèle Standard et ces derniers. L'analyse du groupe porte sur le couplage λ , correspondant à la désintégration de la LSP en deux leptons chargés et un neutrino : les événements recherchés font état de particules supersymétriques produites par des mécanismes conservant la R-parité, et de la désintégration après cascade, de la LSP en particules standard, violant la R-parité. L'état final est alors composé d'au moins quatre leptons chargés et de deux neutrinos qui se manifestent par de l'énergie manquante. Peu d'événements de haute multiplicité leptonique étant attendus dans le MS, l'analyse est basée sur la recherche d'états finaux contenant au moins trois leptons chargés.

Pour des raisons d'antisymétrie, il existe seulement neuf couplages λ , notés λ_{ijk} . Les indices i, j et k valent entre 1 et 3 et se rapportent aux familles des leptons du Modèle Standard : 1 pour l'électron, 2 pour le muon, et 3 pour le tau. Seul le couplage λ_{121} , conduisant à une désintégration avec au moins deux électrons a été considéré par le groupe. Les simulations sont réalisées avec SUSYGEN dans le cadre du modèle mSUGRA. Dans ce modèle, on définit cinq paramètres indépendants : m_0 est la masse commune des sfermions (partenaires supersymétriques des fermions) à l'échelle de grande unification, $m_{1/2}$ est la masse commune des jauginos à cette même échelle, $\tan\beta$ est le rapport des valeurs moyennes dans le vide des 2 doublets de Higgs, μ est le signe du paramètre de mélange des Higgsinos (partenaires supersymétriques des bosons de Higgs), et enfin A_0 est le couplage universel des sfermions et des Higgs à l'échelle de grande unification. Des simulations ont été aussi réalisées dans un modèle MSSM avec des masses de sfermions lourdes (1 TeV) et en laissant M_1 et M_2 (les masses des superpartenaires de $SU(2)_L$ et de $U(1)_Y$) indépendants.

L'analyse est basée sur les données accumulées entre avril 2002 et août 2004 correspondant à une luminosité intégrée de 360 pb^{-1} . L'application des critères de sélection ne conduit à la sélection d'aucun événement pour $0,91 \pm 0,38$ attendus dans le cadre du modèle standard. L'étude, menée dans le cadre du modèle mSUGRA, a permis de mettre des limites supérieures sur la masse des jauginos (partenaires supersymétriques des bosons de jauge) les plus légers : 121 GeV et 234 GeV pour le neutralino1 et le chargino1 respectivement (pour $\mu > 0$, $A_0 = 0$, $\tan\beta = 5$ et $m_0 = 1000 \text{ GeV}$). Dans le cadre du modèle MSSM, un large domaine dans le plan – masse du chargino1 et masse du neutralino1 – est exclu (voir figure 2). Pour une masse de neutralino1 supérieure à

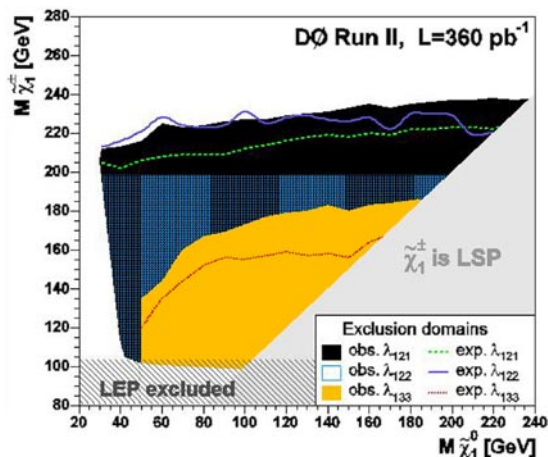


Figure 2: Zone d'exclusion observée et attendue à 95% de confiance pour les 3 couplages λ_{121} , λ_{122} et λ_{133} . Le modèle considéré est le Modèle Standard Supersymétrique Minimal (MSSM) avec des sfermions lourds ($\tan\beta = 5$, $\mu = 1 \text{ TeV}$).

30 GeV, les masses du chargino1 inférieures à 215 GeV sont exclues. Ces limites sont plus contraignantes que celles obtenues par DØ, au Run I.

Cette étude est réalisée en partenariat avec le groupe DØ d'Aix-la-Chapelle (couplage λ_{122}) et celui de l'IRES Strasbourg (couplage λ_{133}). Les filtres d'événements développés pour chaque couplage et qui sélectionnent des topologies e-e-l ou mu-mu-l (l = e ou mu) et e-e-tau sont combinés pour améliorer l'efficacité de recherche pour chaque couplage. Le gain en masse sur les limites des jauginos est de l'ordre de 5-10 GeV pour le neutralino1 et de 10-20 GeV pour le chargino1. Chaque analyse ainsi que la combinaison des trois a donné lieu à des notes internes DØ (voir [1]) et une future publication PRL.

D'autre part, une recherche de production de squarks et de gluinos (en R-parité conservée) vient de démarrer. La topologie recherchée est deux électrons, de l'énergie transverse manquante et des jets. Cette analyse implique une excellente efficacité de reconstruction des jets. Des études ont démarré au sein du groupe afin de l'améliorer dans un environnement à haute luminosité.

Mesure de la section efficace de production de paires de quarks top

Le top est le quark le plus massif, environ 175 GeV (soit la masse d'un atome d'or !!) et le dernier à avoir été découvert (en 1995) bien que son existence ait été prédite dès la mise en évidence en 1977 de son partenaire d'isospin faible, le quark b. Il s'agit donc d'un des composants du Modèle Standard le moins étudié et son analyse est des plus prometteuses.

En effet, le top est un quark particulier parce qu'il se désintègre très vite avant même d'avoir eu le temps de s'hadroniser. Cette propriété permet de remonter directement aux caractéristiques du top en mesurant les produits de sa désintégration. Mais l'intérêt qu'on porte à cette particule provient surtout de sa masse : d'abord parce qu'elle est un des paramètres fondamentaux du Modèle Standard mais surtout parce qu'étant très grande, le top se couple de façon privilégiée au boson de Higgs. Ainsi, la détermination de la masse du top couplée à celle du boson W permet de contraindre fortement la masse du boson de Higgs. De façon plus générale, la masse du quark top étant de l'ordre de l'échelle de la brisure de symétrie électrofaible, on peut penser qu'il joue un rôle important dans cette brisure. De plus, si ces phénomènes mettent en jeu de nouveaux processus non décrits par le Modèle Standard, le quark top ouvre une fenêtre d'exploration vers de la nouvelle physique.

Pour étudier le quark top il faut tout d'abord le mettre en évidence dans les données et étudier sa production. C'est ce que nous faisons ici en mesurant la section efficace de production des paires de quarks (top/anti-top). Au Tevatron, la production de paires de top se fait par l'annihilation d'un quark et d'un anti-quark dans 85% des cas ou par la fusion de gluons (voir figure 3). La probabilité qu'une telle interaction ait lieu est très faible, exactement 10^{10} fois plus faible que la totalité des interactions inélastiques : pour 7 millions d'événements par seconde, une paire de quarks top est engendrée toutes les 24 minutes.

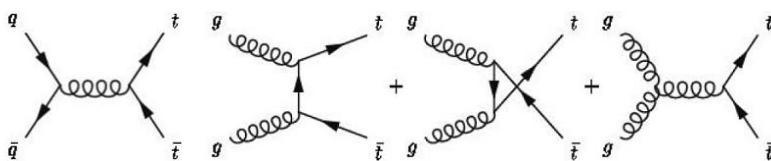


Figure 3: Modes de production des paires de top: par annihilation de quarks (85% des cas au Tevatron) illustrée par le diagramme de gauche, et par fusion de gluons (15% des cas) illustrée par les trois diagrammes de droite.

Le quark top est sélectionné à partir de ses produits de désintégration. Dans le cadre du MS, le top se désintègre dans quasiment tous les cas en un boson W et un quark b. On sépare les états finaux en fonction de la désintégration du W, soit en lepton (électron, muon, tau) et neutrino, soit en paires de quarks (qui donneront deux jets). On distingue ainsi les états finaux « multi-jets » pour lesquels les 2 W se désintègrent en quarks, des états « dileptons » pour lesquels les W se désintègrent en leptons, et du cas mixte « lepton+jet », pour lequel un des W se désintègre en leptons et l'autre en quarks. C'est cette dernière configuration (voir figure 4) que nous avons étudiée, dans laquelle on trouve donc un lepton (électron et muon) de grande impulsion transverse, de l'énergie manquante due au neutrino qu'on ne peut pas détecter et quatre jets dont deux sont issus de quarks b.

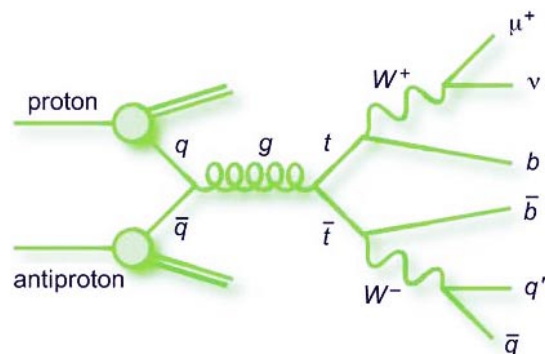


Figure 4: Diagramme de Feynman d'un exemple de production d'une paire top-antitop se désintégrant dans le canal lepton et jets.

D'autres types d'évènements peuvent cependant imiter cette signature. Tout d'abord les évènements W associés à des jets qui ont exactement le même état final, sauf que la probabilité qu'un des jets soit issu d'un b est assez faible. Les évènements multi-jets peuvent aussi ressembler aux évènements top à condition qu'un des jets soit mal reconstruit et soit pris pour un lepton. Les évènements Z associés à des jets et les évènements dibosons (WW, WZ et ZZ) peuvent aussi être pris pour des tops si l'une des particules issues de leur désintégration est mal reconstruite. Pour mieux différencier les évènements top, nous utilisons le fait que deux des jets sont issus de b et que dans 20% des cas ils se désintègrent de façon semi-leptonique. Cela signifie que, dans environ 40% des cas, il y a un muon (ou un électron) dans un jet. Pour l'instant seul l'étiquetage avec les muons est utilisé, en effet l'étiquetage avec les électrons décrit plus haut ne sera suffisamment discriminant que lorsque la nouvelle reconstruction utilisant le détecteur de pieds de gerbes sera en fonction (dès le début 2006).

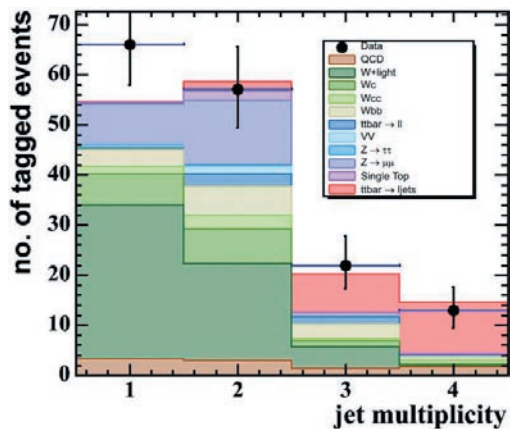


Figure 5: Nombre d'évènements sélectionnés dans le canal muons et jets après étiquetage des jets de b, pour 360 pb⁻¹ de données (cercles) et les différents bruits de fond et signal attendus.

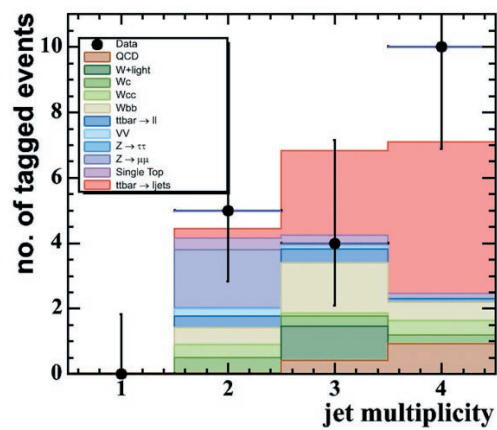


Figure 6: Nombre d'évènements sélectionnés dans le canal muons et jets après étiquetage des jets de b après ajout d'une coupure supplémentaire sur la topologie de l'évènement.

Cela n'est cependant pas suffisant pour éliminer l'ensemble des bruits de fond. Il est donc nécessaire d'évaluer le nombre d'évènements de fond restants. L'efficacité des évènements top, diboson et Z est évaluée avec le Monte-Carlo, ainsi que l'efficacité d'étiquetage des évènements W+jets, en fonction de la saveur des jets. Par contre, la normalisation du nombre d'évènements Z+jets est faite sur les données. De même, le nombre d'évènements W+jets avant étiquetage des b ainsi que le nombre de QCD est évalué directement à partir des données en utilisant la « méthode de la matrice » (voir encadré). Cette méthode repose sur le fait qu'un lepton a une plus grande probabilité de passer des coupures strictes d'identification qu'un jet mal reconstruit. Pour prouver que les fonds sont bien contrôlés, l'analyse est faite en fonction de la multiplicité en jets. Les nombres d'évènements sélectionnés dans les données sont comparés aux simulations des fonds et du signal (Figure 5).

Méthode de la matrice

Si l'indice l représente les évènements passant une série de coupures lâches sur l'identification des leptons et l'indice s les évènements satisfaisant en plus une coupure stricte, et si N_{QCD} est le nombre d'évènements multi-jets et N_{lepton} le nombre d'évènements avec au moins un lepton réel, alors :

$$\begin{aligned}
 N_l &= N_{QCD} + N_{lepton} \quad (1) \\
 N_s &= N_{QCD/s} + N_{lepton/s} \\
 N_s &= p_{QCD} \cdot N_{QCD} + p_{lepton} \cdot N_{lepton} \quad (2)
 \end{aligned}$$

où N_l et N_s représentent respectivement le nombre total de données passant les coupures lâches et strictes et p représente la probabilité pour un type d'évènement de passer la coupure stricte quand il satisfait la coupure lâche.

Les probabilités p sont mesurées sur des lots de données indépendants, et N_l et N_s sont donnés par l'analyse. (1) et (2) forment donc un ensemble de deux équations à deux inconnues desquelles on peut facilement déduire N_{QCD} et N_{lepton} . On déduit de ce dernier chiffre le nombre d'évènements (obtenu par Monte-Carlo) provenant des bruits de fond contenant un lepton réel (Z, di-boson, top) pour obtenir finalement le nombre d'évènements W+jets.

Avant étiquetage des jets b et dans le cas où il n'y a qu'un ou deux jets, les bruits de fond dominent. La section efficace de production de paires de top est mesurée pour les cas où le nombre de jets est supérieur ou égal à 3. On peut aussi choisir d'ajouter une coupure supplémentaire sur la topologie de l'évènement pour augmenter le rapport signal sur fond (Figure 6). L'analyse actuelle est effectuée pour une luminosité d'environ 360 pb^{-1} .

La mesure de la section efficace dans le canal lepton et jets avec étiquetage par les muons est en cours de finalisation. Elle sera comparée et combinée, s'il n'y a pas de désaccord, avec les autres mesures du même canal utilisant des techniques différentes. Ces mesures pourront alors être combinées avec les résultats des autres canaux de désintégrations, les canaux dilepton et totalement hadronique. Ces mesures bénéficieront aussi de l'augmentation de la statistique puisqu'actuellement plus de 1 fb^{-1} de données sont sur bande.

◆ Conclusions et perspectives

À l'arrêt du Tevatron au printemps 2006, environ $1,3 \text{ fb}^{-1}$ de données seront sur les bandes de $D0$, ce qui représente 10 fois la statistique du Run I. L'ensemble des mesures effectuées bénéficiera de l'augmentation de la statistique et la difficulté sera alors de contrôler les erreurs systématiques.

Le travail de fond du groupe sur la calorimétrie sera poursuivi et débouchera en particulier sur une analyse menant à la mesure de la masse du W qui vient de débuter. L'analyse sur la recherche de particules superymétriques en R -parité violée est terminée et est en voie de publication. Elle laisse la place à une analyse cherchant les partenaires supersymétriques des quarks et des gluons. Enfin la mesure de la section efficace de production de paires de top sera poursuivie et améliorée si possible, par l'utilisation de l'étiquetage des b avec les électrons.

[1] Note $D0$ 4982: *Search for R -parity violating Supersymmetry via the LLE Coupling λ_{121} in Final States with $e\ell$ ($\ell=e$ or μ).*

