

RAMEAU observe la pleine Lune à 10 GHz

Hervé Dole

4 Février 2007

Jeudi 1er Février 2007 en début de soirée, alors que le ciel est complètement couvert à Orsay, trois radiotélescopes RAMEAU ont détecté la pleine Lune à une fréquence de 10 GHz (soit 3cm de longueur d'onde) avec un rapport signal sur bruit variant de 5 à 30. Cette première pour RAMEAU illustre l'intérêt et la complémentarité des observations radio, puisque l'astre est détecté à seulement 20 degrés de hauteur au dessus de l'horizon, et sous un ciel opaque au rayonnement visible. Cette observation permet également de mieux caractériser les radiotélescopes, puisque la Lune a une température de brillance environ 30 fois plus faible que celle du Soleil. Nous concluons que le pointage est performant, mais la sensibilité est tout juste suffisante; le signal lunaire n'est pas étalonnable dans la configuration actuelle de RAMEAU, ce qui diminue l'attrait de telles observations dans le cadre d'un enseignement universitaire, sauf pour illustrer de manière très pédagogique la notion de sensibilité. Les perspectives d'évolution de RAMEAU en terme de sensibilité et de stabilité devraient permettre à moyen terme d'utiliser des observations de la Lune (et d'autres astres) de manière quantitative.

1. Contexte

RAMEAU (figure 1) est un réseau de 10 petits radiotélescopes dédiés à l'enseignement (pour plus d'informations, visiter le site web [1]). Observant à une fréquence de 10 GHz avec du matériel grand public, il est utilisé par les étudiants pour observer l'émission solaire radio depuis la salle de contrôle.

La sensibilité des radiotélescopes est cependant limitée dans la configuration actuelle, de sorte que seules des observations du Soleil sont possibles dans de bonnes conditions et incluent un étalonnage.

Fin Janvier 2007 (cf le rapport [2]), nous avons installé des amplificateurs en ligne sur les radiotélescopes pour compenser en partie les pertes engendrées par les 40 mètres de câble coaxial utilisés pour transmettre le signal (abaissé en fréquence à 1 GHz par le LNB) du receptrer (LNB) au détecteur (SatFinder). Cette amélioration de performance laissait suggérer que la détection de la Lune serait possible, malgré son flux environ 25 à 30 fois inférieur à celui du Soleil calme à 10 GHz.

Ce rapport détaille les observations et la détection de la pleine Lune à 10 GHz, et discute des performances de RAMEAU.



Figure 1: le réseau de 10 radiotélescopes RAMEAU à Orsay.

2. Les observations de la pleine Lune à 10 GHz

2.1 Technique

La technique d'observation est celle du transit dans le champ de vue de l'instrument (voir les articles [3,4]): le radiotélescope est fixe par rapport au sol, mais pointe le voisinage de la cible, de telle sorte qu'avec la rotation terrestre elle passe dans le champ de vue de l'instrument (appelé "lobe"). Le signal mesuré est donc plat et faible quand la source est hors du lobe, augmente quand la source est au bord du lobe, et présente un maximum quand la source est au centre du lobe, puis redécroit quand elle sort. Cette courbe est la signature d'un astre si le transit dure une dizaine de minutes pour une antenne de 80cm à 10 GHz.

2.2 Choix de la pleine Lune

Pour tenter la première détection de la Lune avec RAMEAU à 10 GHz, le choix s'est porté pour une phase proche de la pleine Lune. En effet, l'émission thermique radio lunaire a pour origine la température des quelques premiers centimètre de sa surface. On s'attend donc à un maximum d'émission radio vers la pleine Lune ou un peu après. Par ailleurs, la visibilité de la pleine Lune rend compatible son observation à des horaires raisonnables, par exemple en soirée.

2.3 Observations

J'ai effectué une première tentative le mercredi 31 janvier 2007 (phase: 97% pleine), sans toutefois avoir vérifié le pointage par une observation classique d'étalonnage sur un satellite géostationnaire. Après une heure de tâtonnements, j'ai obtenu une moitié de transit à 17h30 sur la Lune. Il fallait cependant reproduire cette mesure pour la valider.

Les observations du jeudi 1er Février (phase: 99%) ont été réalisées avec 3 stations RAMEAU, soit 6 antennes au total. Après une phase de confirmation d'étalonnage du pointage sur un satellite géostationnaire, les observations ont commencé sans succès, puisque la Lune était trop basse sur l'horizon: le signal reçu par RAMEAU est dominé par l'émission thermique du sol et du mur coté Est. Il a donc fallu attendre que la Lune se détache de l'horizon local.

A une quinzaine de degrés de hauteur, la Lune était détectable. Mais aucune antenne RAMEAU ne recevait le signal attendu. La cause en est le gain utilisé par le détecteur (SatFinder): il était réglé de telle sorte que la source d'étalonnage (le sol à ~300K) ne sature pas l'électronique.

Face à cette non-détection, j'ai augmenté significativement le gain des détecteurs. La Lune est ainsi détectée sans ambiguïté. Le problème est que l'étalonnage sur le sol n'est plus possible puisqu'il sature. Il est essentiellement impossible de tracer les variations de gain de l'électronique puisqu'il n'y a plus de référence.

Entre temps, deux antennes (R07 et R08) ont vu leur sensibilité décroître de manière importante (origine inconnue), les rendant inopérantes pour cette mesure. Une troisième (R05) présentait un petit décalage en pointage connu par rapport à R06; afin d'optimiser mon temps pour les mesures, je me suis concentré sur R06 (tout en laissant R05 active). Ainsi trois antennes ont mesuré l'émission thermique de la Lune: R06, R09 et R10.

3. Résultats

La figure 2 montre le signal brut lunaire reçu en volt (et qui est proportionnel à la puissance rayonnée), en fonction du temps (en minutes), alors que la figure 3 montre le bruit des antennes. Pour améliorer la visibilité des graphes, j'ai décalé arbitrairement chaque mesure en temps (axe horizontal) afin de faire coïncider les maxima. **7 transits indépendants (dont 2 complets) ont été mesurés par 3 antennes différentes.** Plusieurs conclusions importantes peuvent être tirées de ces figures.

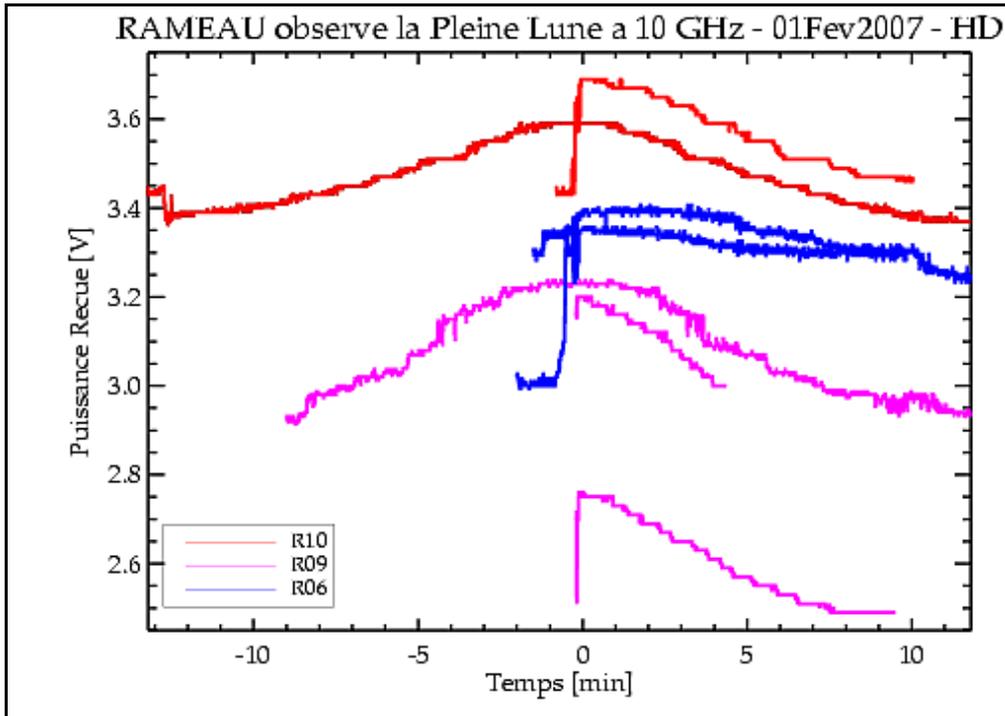


Figure 2: les 7 transits lunaires bruts observés avec 3 antennes de RAMEAU le jeudi 1er Février 2007, entre 18h et 20h30. Seuls 2 transits sont complets, les autres ayant été mesurés à partir du maximum. Les transits ont été arbitrairement décalés en temps (horizontalement) pour faire coïncider les maxima. Les différentes tensions mesurées dépendent du gain utilisé, et qui a été modifié à plusieurs reprises. La couleur indique l'antenne utilisée: R06, R09 et R10.

3.1 Niveau de bruit

La figure 3 montre le signal brut des radiotélescopes lorsqu'ils pointent le fond de ciel. **Le signal est stable et présente un bruit de l'ordre de 0.01V sur 10 minutes.** Le décalage du niveau moyen provient de l'électronique et n'est pas étalonnable dans la configuration actuelle, sauf si l'on désire effectuer un étalonnage relatif entre les antennes. Par ailleurs, certaines de ces mesures ont été effectuées avec un gain légèrement différent des mesures lunaires.

3.2 Détection de la Lune

Le signal observé sur la figure 2 est donc bien lunaire et n'est pas causé par le bruit. La courbe de transit caractéristique d'un astre passant dans le lobe de l'instrument [3,4] est bien visible. Cependant, le temps de transit total (calculé avec la largeur à mi-hauteur) s'étale entre 6 et 14 minutes, alors qu'il devrait être constant et de l'ordre de 10 minutes.

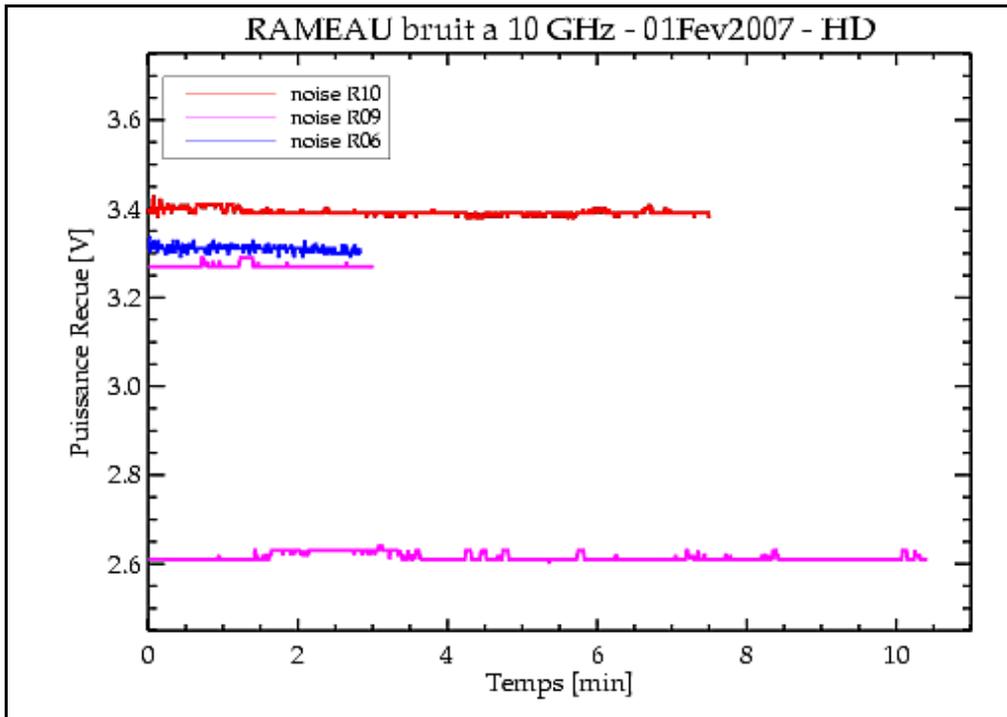


Figure 3: les 3 mêmes antennes mesurent le fond du ciel. Il n'y a pas de dérive pendant ces mesures nocturnes. Le bruit est de l'ordre de 0.01V sur chaque antenne.

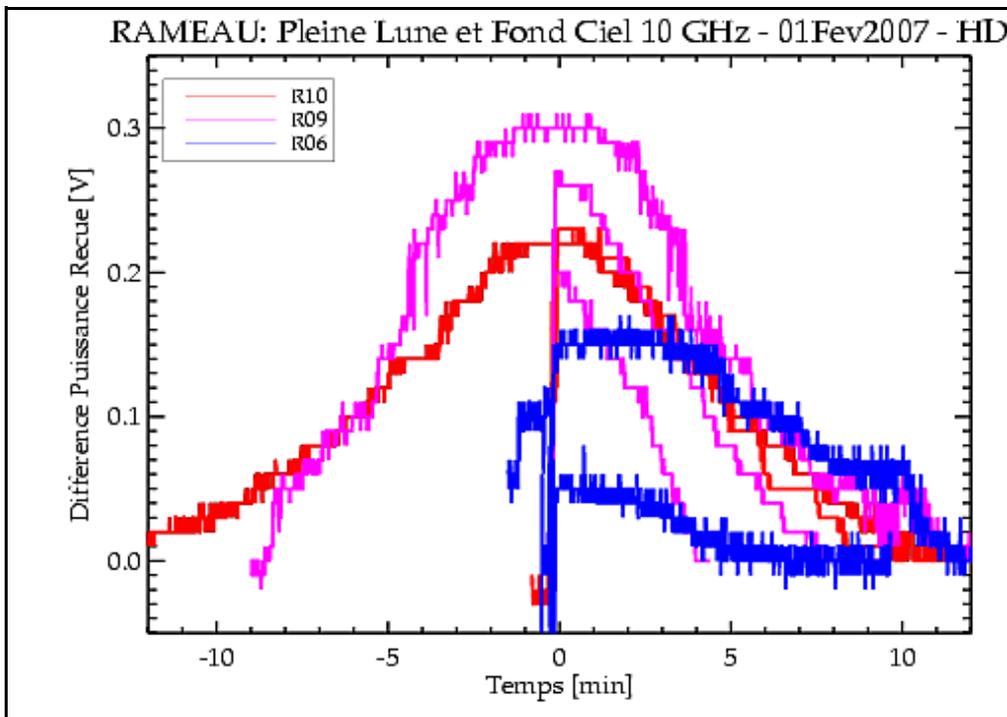


Figure 4: les 7 transits lunaires avec fond de ciel soustrait. L'estimation basique du fond de ciel consiste à prendre le signal en toute fin de transit, et à calculer la médiane sur 20 mesures. La détection des transits est obtenue avec un rapport signal sur bruit compris entre 5 (R06) et 30 (R09).

4. Analyse

4.1 Rapport signal sur bruit des détections

La figure 4 montre les observations brutes desquelles ont été soustraites une estimation basique du fond de ciel. Cette estimation est la médiane sur 20 mesures du signal en toute fin de transit. Il aurait fallu dépointer l'antenne de plusieurs degrés par rapport à la Lune pour effectuer ces mesures de fond de ciel.

On observe que les transits présentent des maxima entre 0.05V (pour une des mesures de R06) et 0.30V (pour R09). Etant donné un bruit mesuré de 0.01V, on obtient **un rapport signal sur bruit de nos détections variant de 5 à 30 selon l'antenne. La Lune est donc détectée sans ambiguïté à 10 GHz avec RAMEAU.**

4.2 Durée des transits

La figure 5 présente les données normalisées au maximum, de sorte que toute la dynamique se trouve comprise entre les unités arbitraires de 0 et 1. Il est aisé de mesurer la durée des transits correspondant à la largeur à mi-hauteur (0.5) du signal.

On obtient 6 minutes pour une mesure de R06 et R09. Cette valeur faible provient certainement d'un pointage ne correspondant pas au centre de la Lune: le transit est écourté puisque l'on observe qu'une corde du disque lunaire au lieu du diamètre. Cette interprétation est renforcée par le fait que le signal obtenu est à chaque fois le plus faible des mesures de chaque antenne (figure 2). Remarquons ici l'intérêt crucial des observations redondantes.

On obtient 7 à 10 minutes pour les autres mesures de R09 et la mesure de R10, ce qui semble convenable.

On obtient finalement 14 minutes pour l'un des transits de R06. Les figures 2 et 5 montrent que les mesures de R06 sont celles présentant le plus de bruit (et le moins de dynamique). Elles ne sont donc pas significatives. Il aurait fallu obtenir plus de transits avec cette antenne.

Finalement, la durée de transit obtenue par 2 mesures de R09 et 1 mesure de R10 est approximativement cohérente avec les attentes d'un passage en 10 minutes.

La détection de la Lune dans ces conditions montre que le pointage de RAMEAU donne toute satisfaction dans la limite de la précision de pointage de 1 degré.

4.3 Problème d'étalonnage: gain différent

RAMEAU est-il suffisamment sensible ? Malgré une détection de la Lune avec un rapport signal sur bruit décent, nous avons vu qu'il est:

- nécessaire d'effectuer plusieurs mesures pour obtenir un signal exploitable, ne serait-ce que pour confirmer que la durée du transit est cohérente;
- nécessaire d'augmenter le gain des SatFinders au maximum pour permettre ces détections de nuit. On peut s'attendre de jour à des dérives très importantes, observées par ailleurs [3,4];
- impossible d'étalonner RAMEAU sur le sol avec un gain aussi élevé puisqu'il sature.

Dans sa configuration actuelle, RAMEAU dispose donc juste de la sensibilité requise pour observer la pleine Lune. Il est probable qu'elle soit limite ou insuffisante pour les observations des autres phases, ou pour une éclipse totale, bien que cela reste à confirmer.

Le principal problème réside dans la détection du signal. Il faudrait un dispositif stable avec un gain linéaire (ou en tout cas proprement étalonnable) pour permettre

d'effectuer des mesures d'étalonnage en observant la Lune. On pourrait aussi envisager une autre source d'étalonnage que le sol.

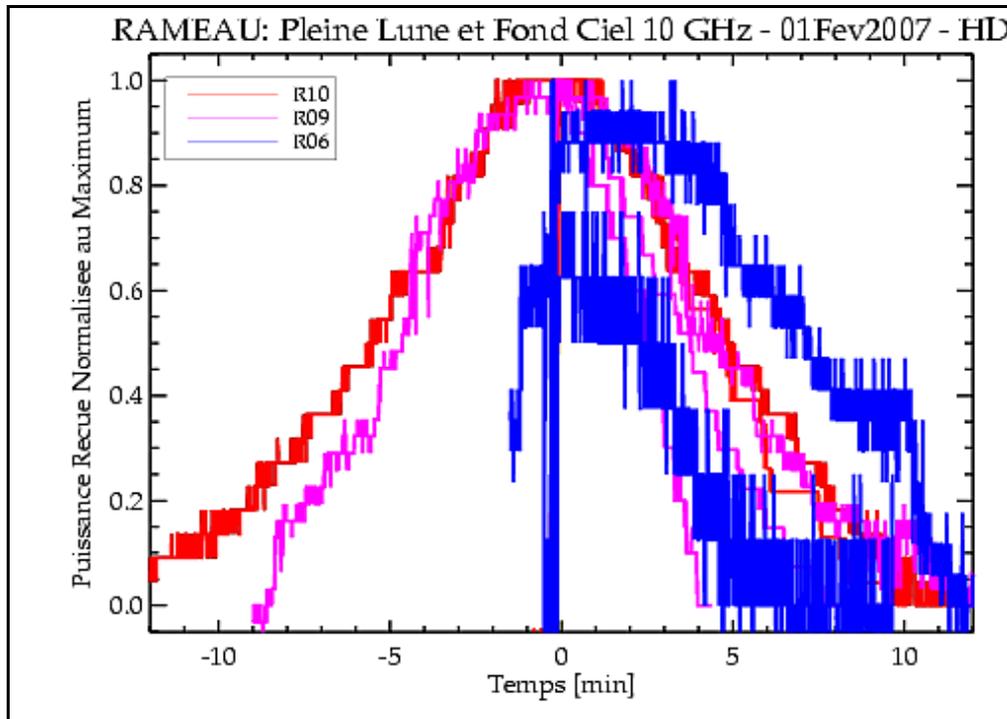


Figure 5: les 7 transits lunaires normalisés. Cette figure reprend les données de la figure 3 (données moins fond de ciel) et normalise chaque transit à son maximum. Cette normalisation permet de comparer la forme de chaque transit, indépendamment du gain utilisé; cependant, l'étalonnage éventuel n'est pas conservé dans cette représentation.

4.4 Comparaison

En 2001, C. Monstein [5] a observé la Lune (figure 6) à la même fréquence que RAMEAU avec un dispositif comparable au nôtre (bien que plus élaboré en terme d'étalonnage et surtout de récepteur). Il a observé la Lune pendant une lunaison complète, et détecte une variation de flux lunaire à 10 GHz en fonction de la phase. Il obtient une température moyenne de brillance de $T_{\text{lune}} \sim 210\text{K}$ pour la pleine Lune, alors que la température système de son installation est mesurée vers $T_{\text{sys}} \sim 90\text{K}$.

RAMEAU, en détectant la Lune à la même fréquence, est donc sensible à un astre de température de brillance de 210K avec une taille angulaire de 30 minutes d'arc. Cette brillance correspond à environ 1/30e à celle du Soleil calme à cette fréquence.

4.5 Implications pour l'enseignement

Dans la mesure où il n'est pas possible d'étalonner l'observation de la Lune à 10 GHz avec RAMEAU dans sa configuration actuelle, l'intérêt de proposer une telle observation aux étudiants paraît limité, contrairement aux observations solaires qui permettent de discuter quantitativement de physique (corps noir, processus d'émission thermique et non thermique).

Les observations lunaires peuvent cependant illustrer de manière pertinente et ludique la notion de sensibilité d'un instrument et son adéquation avec le signal recherché (et observé), tout en permettant de discuter les facteurs limitant la sensibilité.

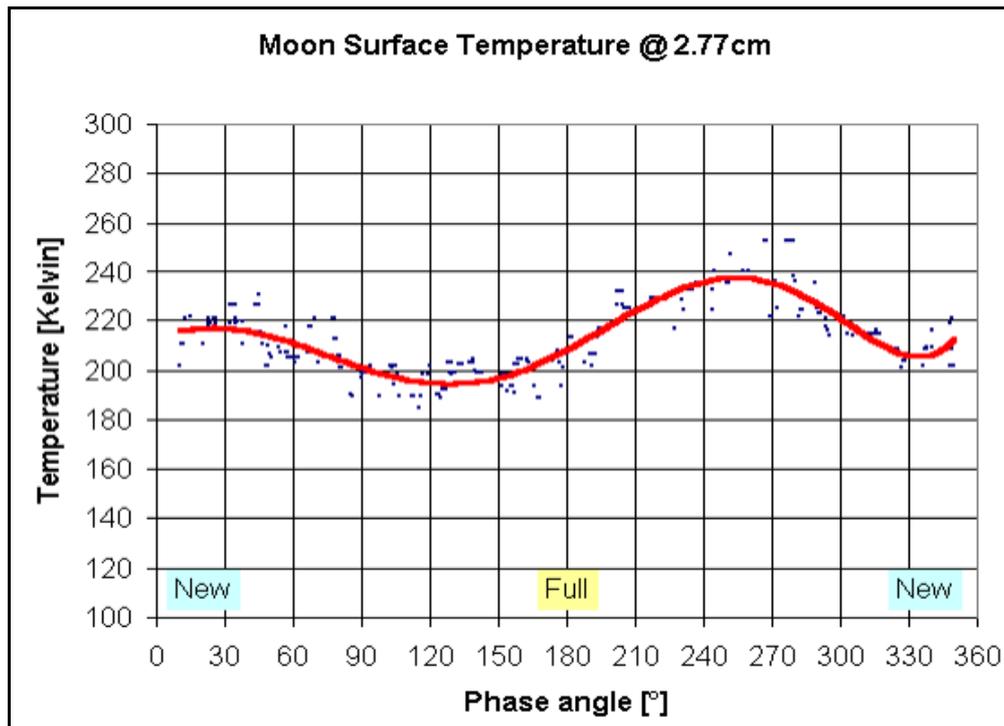


Figure 6: température de brillance de la Lune mesurée à 10 GHz par C. Monstein [5]. La température de brillance est de l'ordre de $210 \pm 5K$ le jour de la pleine Lune.

4.6 Perspectives

Il serait pertinent, dans un avenir proche, de renouveler ces mesures pour d'autres phases de la Lune, en utilisant plus d'antennes et en effectuant des mesures de fond de ciel plus appropriées.

A moyen terme, il est nécessaire de faire évoluer notre système de détection, en remplaçant le SatFinder par un détecteur maison, du type de celui d'A. Nierveze [6] par exemple. Une autre solution élégante pourrait être l'utilisation d'un LNB modifié avec référence interne et détection synchrone telle que développée par Michel Piat (APC) [7].

5. Conclusion

Cette première observation de la Lune avec RAMEAU à 10 GHz montre que l'instrument dispose d'un pointage et d'une sensibilité adéquate (rapport S/B entre 5 et 30), la Lune étant environ 30 fois plus faible que le Soleil. Cependant, cette détection est difficile car il faut augmenter le gain des détecteurs au maximum, ce qui rend impossible l'étalonnage avec le sol et pourrait entraîner de nombreuses dérives électroniques (pas observées de nuit mais déjà mesurées de jour). D'autres mesures sont nécessaires pour renforcer ces conclusions (notamment lors d'autres phases). Bien que la détection de la Lune soit pédagogique et ludique, il est impossible dans la configuration actuelle de quantifier sa température de brillance. L'amélioration progressive à laquelle nous songeons à moyen terme de RAMEAU (détecteur et récepteur) devrait permettre d'observer la Lune (et d'autres astres) dans de bien meilleures conditions.

6. Références

- [1] site web RAMEAU: <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/rameau/>
 - [2] “*Installation des amplificateurs 1 GHz pour RAMEAU*”, Janvier 2007, rapport en ligne RAMEAU [8], H. Dole
 - [3] “*Soleil, Eclipse et Radioastronomie: ca marche*”, Astronomie Magazine, Mars 2006, 77, 16, H. Dole
 - [4] “*L'éclipse partielle observée à 10 GHz avec RAMEAU depuis Orsay*”, L'Astronomie, Juillet-Aout 2006, 120, 396, H. Dole, S. Pascal, A. Lenoir
 - [5] “*The Moon's temperature at a wavelength of 2.77cm*”, C. Monstein, 2001 (ETHZ, Institute of Astronomy, Zurich, Suisse): <http://www.monstein.de/astronomypublicationsMoonEnglishHtml/Moon2001V2.htm>
 - [6] détecteur de Alain Nierveze: <http://www.radio-astronomie.com/fidet.htm>
 - [7] “*Modification du LNB 10 GHz pour le transformer en Dicke switch, et utilisation*”, Septembre 2006, rapport en ligne RAMEAU [8], H. Dole
 - [8] Rapports en ligne disponibles sur: <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/rameau/resultats.php>
-