

VERS UN INDICE DE QUALITE DES SITES DU POINT DE VUE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

INTERVENTION DE MICHEL BONAVIDACOLA

deuxième congrès national de pollution du ciel nocturne (Octobre 1998 Rodez)

Ces trois chapitres ont été publiés sur la revue « PULSAR » en 2000

0 - INTRODUCTION

1 – MODELISATION DES HALOS DES VILLES

- 1.1 Deux approches complémentaires
- 1.2 Réduction du nombre de paramètres

2 – ZONES D'INFLUENCES DES VILLES

- 2.1 Le modèle de walker
- 2.2 Exemple de l'utilisation de la loi de walker
- 2.3 Etude sur le terrain des zones d'influences des villes
- 2.4 Etablissement d'une échelle de nuisance
- 2.5 Applications :
 - 2.5.1 Influence de la distance et du temps
 - 2.5.2 Application à une région ou un pays

3- QUALITE DU CIEL EN UN SITE DONNE

- 3.1 Nature du problème
- 3.2 Etablissement des cartes de site

4 – LES INDICES DE QUALITE DE SITE DU POINT DE VUE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

- 4.1 Pourquoi un indice de qualité
- 4.2 Bases techniques de l'indice
 - 4.2.1 Base théorique
 - 4.2.2 Calibration de la relation reliant l'indice global qualité à la note de qualité .
- 4.3 Utilisation de l'indice et de la note

5 – CONCLUSIONS

6- ANNEXES

- 6.1 Développements mathématiques de l'indice de qualité d'un site du point de vue de la pollution lumineuse
- 6.2 Recalage du modèle

0 - INTRODUCTION

Lorsque l'on observe le ciel de nuit depuis différents sites on perçoit une énorme différence de qualité concernant la transparence du ciel . Près des grandes villes la voie lactée n'est pas visible , elle apparaît lorsque l'on s'en éloigne . Ceci veut dire implicitement que l'on peut définir une relation entre l'éloignement des agglomérations et la transparence du ciel.

Cette relation est complexe et dépend de nombreux paramètres . Malgré tout en réfléchissant un peu , et en s'appuyant sur l'expérience des observateurs , il est possible de modéliser au premier ordre les halos lumineux des villes , ainsi que les nuisances engendrées , le but étant de hiérarchiser les sites. Ici l'on résonne en écart par rapport à une référence plutôt qu'en absolu.

Après avoir jeté les bases d'une modélisation globale je propose une méthode simple : l'indice de site (du point de vue de la pollution lumineuse) . Celui ci permettra de noter (entre 0 et 10) la qualité de n'importe quel site (du point de vue de la transparence du ciel) . Il est évident que cette proposition est une des approches possibles et que les fondements de cet indice peuvent évoluer. Par contre cet indice doit être rigoureusement établi si l'on veut qu'il soit crédible .

Cet indice est construit dans le même esprit que ceux concernant les plages et celui de la pollution atmosphérique lesquels , malgré les réticences engendrées au départ , ont permis de bien faire avancer les choses . La démarche générale de cet exposé est la suivante :

- modéliser correctement l'impact du halo lumineux de chaque ville sur le fond du ciel.
- Pour cela trouver les paramètres principaux régissant la nuisance engendrée.
- Etablir un modèle simple et recouper par l'expérience . Puis généraliser.
- A partir de là en un site donné il suffit de repérer les villes en azimut et en distance . Ainsi on peut estimer globalement la dégradation du site dans tous les azimuts.
- Ensuite par calcul on déduit un indice correspondant à ce site que l'on compare à une échelle calibrée d'indices de référence.
- On en déduit par comparaison une note correspondant au site . Cette note est évidemment relative aux références choisies.
- Après plusieurs campagnes de calibration cet indice s'affinera de lui même.

1- MODELISATION DES HALOS LUMINEUX (approche globale)

1.1 DEUX APPROCHES COMPLEMENTAIRES :

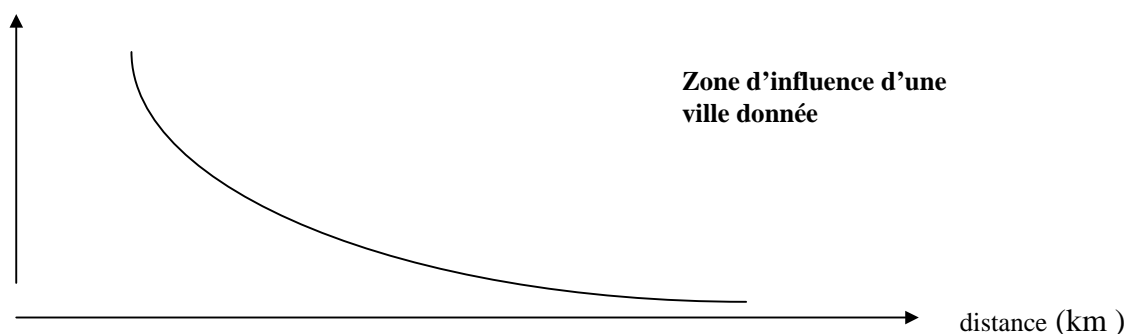
Il y a deux manières d'appréhender l'impact des halos lumineux des villes sur le fond de ciel :

- soit en considérant une ville et en étudiant sa zone d'influence
- soit en se positionnant en un site d'observation isolé et en découvrant l'horizon autour de soi .

Les 2 approches sont complémentaires .Il faut d'abord bien modéliser la dégradation du fond de ciel due à la proximité d'une ville. Puis étudier son influence sur le site considéré.

Par expérience chacun d'entre vous sait que lorsque l'on s'éloigne d'une ville , le ciel est de moins en moins dégradé .La luminosité du fond de ciel diminue jusqu'à atteindre la luminosité du fond de ciel naturel. (voir ci dessous)

Augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel naturel (Arlfc)



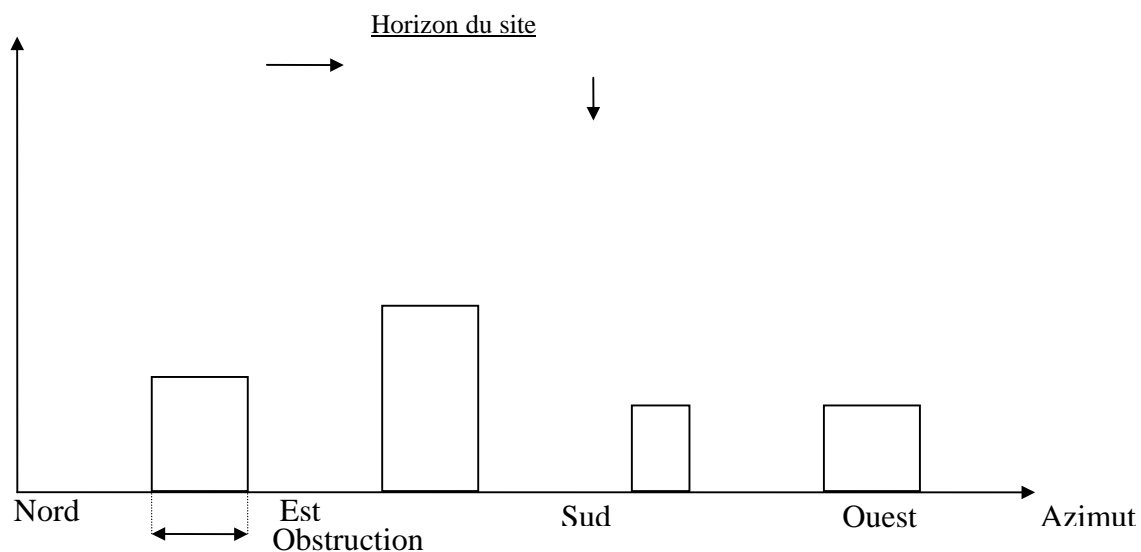
Une autre démarche consiste à choisir un site d'observation loin des villes .Alors en scrutant l'horizon (si on tourne sur soi meme de 360 degrés) on constate que des villes (donc les halos) nous entourent dans tous les azimuts . Chacune de ces villes a une population donnée et se trouve à une distance donnée de l'observateur. Chacun de ces villes engendre un dégradation du fond de ciel du site autour de l'azimut qui lui correspond.

On peut donc tracer en abscisse l'azimut et en ordonnée l'augmentation relative de luminosité par rapport à celle du fond de ciel observé un diagramme du type de celui présenté dans la figure ci après.

Cette fonction est une caractéristique du site considéré .

Ici apparaît naturellement la notion de qualité d'un site du point de vue de la pollution lumineuse .Sur un site donné plus la luminosité du fond de ciel sur tout l'horizon sera élevée plus le site sera dégradé . Il reste à bâtir un modèle cohérent pour affiner ces notions simples, puis à faire émerger un indice de site . Ceci nous permettra d'établir une notation rigoureuse des sites d'observations du point de vue de la pollution lumineuse .C'est l'objectif de l'exposé qui suit.

Augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel naturel (Arlfc)



1.2 REDUCTION DU NOMBRE DE PARAMETRES

Lors du premier congrès de Rodez , dans la commission recherche et développement j'avais montré la complexité du phénomène physique de la « pollution lumineuse ».Les 2 interventions étant :

- La diffusion de la lumière dans l'atmosphère.
- Notion de climatologie urbaine.

La diffusion de la lumière des villes vue par l'observateur est très complexe et dépend de nombreux paramètres.

- Flux lumineux émis (donc population ou zone d'activité.....)
- Paramètres atmosphériques (urbain ou locaux ...)
- Distance ville / observateur
- Heure
- etc

Il s'agit d'étudier de manière globale l'impact sur le site étudié .Pour établir un modèle simple il y a lieu de commencer impérativement par réduire le nombre de paramètres qui agissent sur le phénomène . Des expériences ont été menées dans les observatoires professionnels (leur but étant d'établir une base technique et juridique pour une meilleure protection des observatoires professionnels).

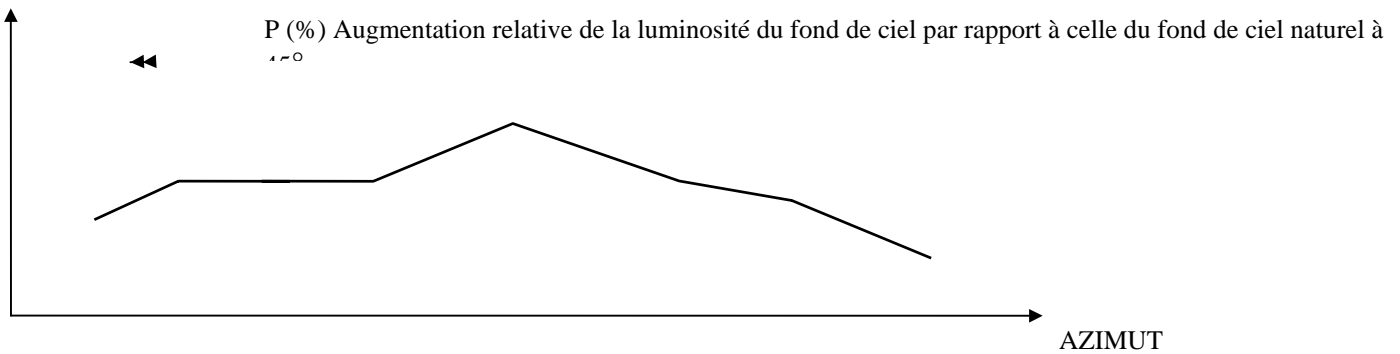
Basé sur l'expérience des modèles ont été établis. Les hypothèses sont les suivantes :

- Heure —————> Nuit noire : Fond de ciel naturel (poussières, lumière zodiacale...)
- Météo —————> air sec

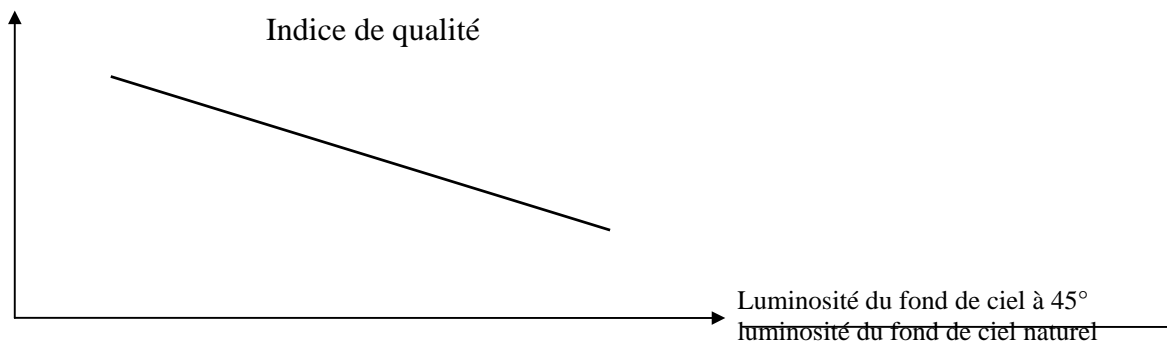
- Dans un premier temps : nous utiliserons le modèle de Walker . On ne tient compte que de la population des villes .
- Elévation : 45° au-dessus de l'horizon dans la direction observateur / ville (Walker)
- Distance > rayon : l'observateur se trouve à l'extérieur des villes

L'établissement d'un modèle simple et global s'effectue en balayant l'horizon en azimut à une élévation de 45 degrés au dessus de l'horizon. La démarche est la suivante :

- mesurer l'augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel naturel dans une zone limitée en élévation (figure ci après)



- En déduire le flux lumineux global envoyé vers le site et « son horizon ».
- Comparer ce flux lumineux « perturbateur » (ou un paramètre qui lui soit homogène) à celui de sites calibrés.
- En déduire un indice de qualité du site



2. ZONE D'INFLUENCE DES VILLES

Commençons par étudier l'influence des villes sur la campagne environnante.

2.1 LE MODELE DE WALKER

La base de la théorie est exposée dans le rapport de l'Académie des Sciences écrit par Jean Kovalevsky, sous le titre « Protection des observatoires astronomiques et géodésiques ».

Elle est issue de l'expérience et s'exprime comme suit :

I = accroissement relatif de l'éclat du fond du ciel par rapport à la luminosité du ciel naturel à 45 degrés au-dessus de l'horizon dans la direction de la ville.

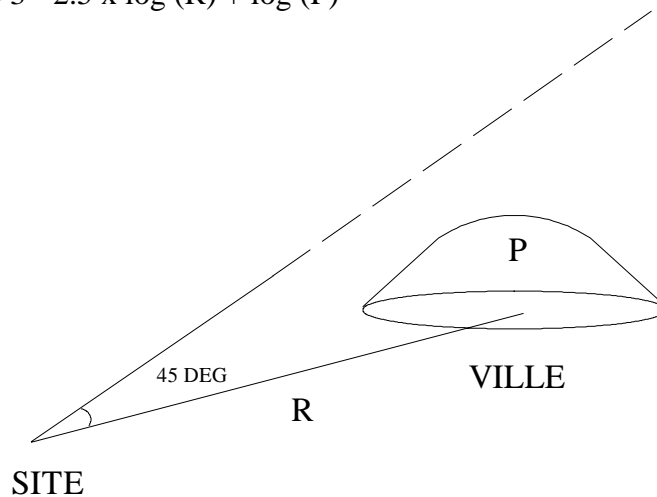
R = distance en kilomètre de l'agglomération

P = population en milliers d'habitants

$$I = K \times P / (R^{2.5})$$

Soit :

$$\log I = 3 - 2.5 \times \log (R) + \log (P)$$



Plusieurs remarques s'imposent :

- la référence du fond de ciel naturel est de 4 candélas / mètre carré soit une magnitude par seconde d'arc carré de 21.6 ..
- cette loi est particulièrement intéressante à utiliser en raisonnant en écarts .C'est à dire en comparant des situations différentes : N villes à meme distances ou à des distances différentes , à des dates différentes , ou de meme impacts ou
- Cette loi dite de « walker » n'est , en apparence , fonction que de la distance ville / observateur et de la population. En fait elle est plus subtile qu'il n'y paraît et fait implicitement apparaître la relation avec le flux de lumière émis par la ville .Pour plus de précisions se reporter au rapport de l'académie des sciences.
- D'autres lois ont été étudiées (voir en annexe) .Mais cette loi simple reste globalement correcte.
- Elle est facilement programmable .De plus en jouant sur certains paramètres , sur les exposants notamment , on peut la recalibrer facilement pour recouper des campagnes de mesures.
- Le programme THOT que j'ai conçu et écrit est basé sur cette loi . Toutefois si demain une loi plus fine est adoptée , les modifications à effectuer pour adapter le programme THOT seront mineures .

2.2 EXEMPLE D'UTILISATION DE LA LOI DE WALKER

On peut en raisonnant en écarts obtenir très rapidement des résultats très intéressants.

Une comparaison des halos de TOULOUSE et PARIS dans le temps vous est présentée.

Les 2 tableaux ci après présentent l'augmentation de luminosité du fond de ciel par rapport à la luminosité du fond de ciel naturel en regardant dans la direction des villes à 45 degrés au dessus de l'horizon lorsque l'on s'éloigne de chaque agglomération . Ils ont été calculés en utilisant le modèle de Walker . Les écarts de luminosité sont présentés en magnitude surfacique (mg/ seconde d'arc carré) . Les écarts sont donnés pour 2 années .

On peut ainsi , pour chacune des villes , analyser l'évolution de la dégradation entre les 2 année .

■ Agglomération de Toulouse

	distance du site	10 km	20 km	30 km	40 km	80 km
année	population					
1975	440 000 hab	2.9	1.3	0.7	0.4	0.0
1990	650 000 hab	3.3	1.7	0.9	0.5	0.1
👉		0.4	0.4	0.2	0.1	0.1

- Agglomération Parisienne

	distance du site	20 km	40 km	60 km	80 km	100 km
année	population hab					
1975	8152 000	4.2	2.4	1.5	1.1	0.6
1990	9318 000	4.3	2.5	1.6	1.0	0.7
👉		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Δ magnitude 0.1 (soit environ 10%) à plus de 200 km de distance

Δ magnitude 0.2 (soit environ 20%) à environ 170 km de distance

Le critère de 10% d'augmentation de luminosité du fond de ciel (correspondant approximativement à un accroissement de magnitude 0.1) est le seuil détectable à partir duquel un site commence à se dégrader . On voit ici que Toulouse influence la qualité du ciel jusqu'à 80 km de distance alors que pour Paris cela atteint 200 km.

Autre remarque : la situation de Toulouse se dégrade relativement vite (ceci se constate réellement sur les sites d'observations) . Si on compare les années 1975 et 1990, on constate que jusqu'à 20 km le ciel s'est beaucoup dégradé (0.4 magnitude) alors que sur Paris le résultat est moindre (0.1 magnitude quelle que soit la distance). Cela signifie simplement qu'à Paris la situation est tellement dégradée qu'elle peut difficilement être pire (phénomène de saturation).

2.3 ETUDE SUR LE TERRAIN DES ZONES D'INFLUENCE DES VILLES

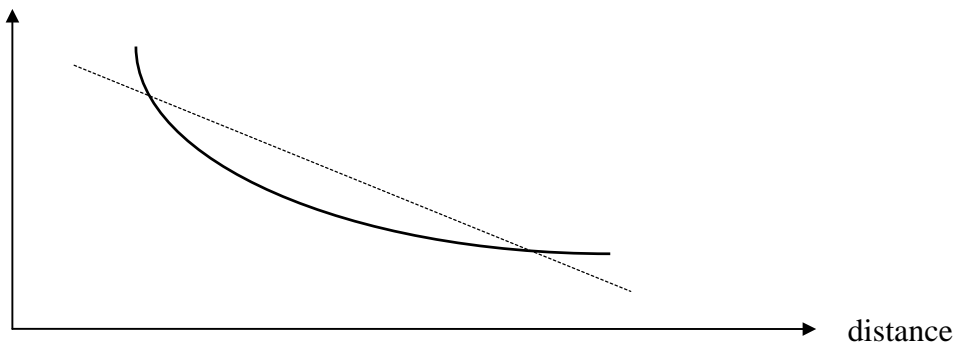
Pour une ville (ou agglomération donnée) on étudie l'évolution de la luminosité du fond de ciel en fonction de l'éloignement.

L'augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport au fond de ciel naturel tend vers 0 avec l'éloignement . On peut exprimer la luminosité du fond de ciel en magnitudes réparties en seconde d'arc carré (voir annexes). On obtient alors l'allure de la courbe en pointillé (figure ci dessous) , la courbe en trait plein étant l'augmentation en pourcentage.

Ces fonctions sont facilement programmables .

Augmentation de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel naturel

% ou magnitude



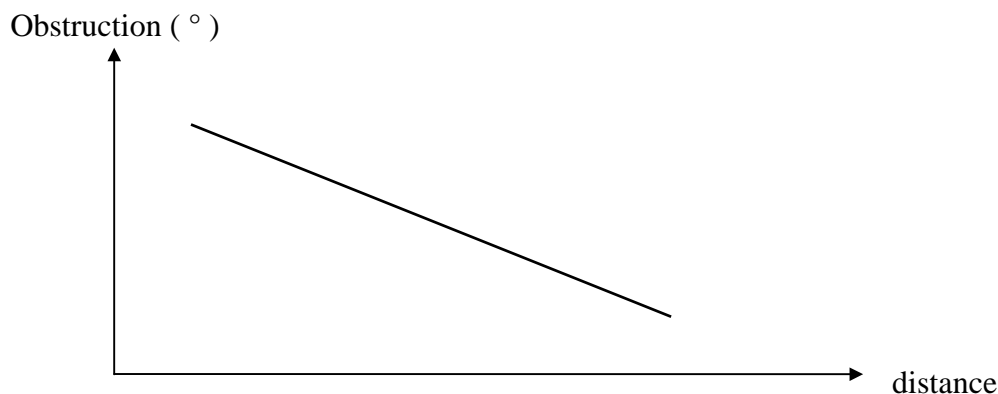
Un paramètre n'est pas exprimé dans la loi de Walker : il s'agit de **l'obstruction** .Pourtant ce paramètre est fondamental.

L'obstruction est en fait l'angle qui sous tend le mètre couple de la ville vue du site d'observation .

Plus la ville est étendue , plus , à distance donnée , l'obstruction est importante .

Mais aussi pour une ville donnée plus on s'éloigne plus cet angle est faible (figure ci dessous) .

C'est de la pure trigonométrie .



Le couplage entre l'obstruction et la luminosité du fond de ciel va permettre de calculer la dégradation en termes de flux lumineux total par rapport au flux émis par le fond de ciel naturel .

Donc d'accéder à la dégradation réelle du site .

2.4 ETABLISSEMENT D'UNE ECHELLE DE NUISANCE

Sans être un spécialiste on peut définir différentes catégories de dégradation du ciel :

- ville ou banlieue : très dégradé , mauvais
- grande banlieue : dégradé : la voie lactée est devinée et non décelée
- ciel de campagne : site correct , la voie lactée est vue mais n'atteint pas l'horizon (50 km d'une agglomération)
- ciel de site isolé : bon à très bon site : voie lactée évidente jusqu'à 20 degrés au dessus de l'horizon)
- site très isolé : voie lactée magnifique étendue jusqu'à l'horizon.

Naturellement il s'en dégage une échelle de qualité de site du point de vue de la pollution lumineuse .On peut alors calibrer une loi basée sur l'analyse de sites connus correspondant sur le terrain au fait suivant :

Si vous observez dans la direction de la ville à 45 degrés au dessus de l'horizon et que vous recherchez un site d'une certaine qualité il faudra dès lors vous éloigner de X kilomètres de la ville.

Pour chaque ville on peut donc définir sa zone de nuisance (Exemple indiqué sur la figure suivante : Toulouse (gênant à 25 km , peu gênant à 50 km ,à peine détectable à environ 100 km)) .

Pour chaque ville on définit ainsi un réseau de cercle concentriques correspondant à une gradation de nuisances .

On peut reporter ce type de gabarit sur n'importe quelle carte IGN.

Mais attention , ce raisonnement suppose que la ville est isolée et ne tient pas compte des autres villes .En fait nous obtenons par ce gabarit simple les candidats potentiels. Si on veut trouver « pile » le bon site il faut passer à une étude plus fine .L'étude de site exposée plus loin .

Cet échelle de nuisance à été l'objet de longues transactions entre moi meme et un groupe d'observateurs expérimentés qui ont évalué les sites autour de Toulouse .Partant de ces évaluations j'ai traduit ces observations en termes de dégradation de la luminosité du fond de ciel à partir de la loi de Walker. Ce sont ces seuils (en termes de magnitudes et de pourcentage d'augmentation de luminosité du fond de ciel) qui ont été retenus . J'ai ensuite généralisé ces seuils de façon à obtenir un échelle de nuisance.

Ainsi pour chaque ville on peut définir géographiquement la zone de nuisance.

Le tableau ci après présente l'échelle de nuisance ainsi établie :

naturel	augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel			
Halo	Δ magnitude *	% *	Type de ciel	Exemple pour Toulouse
Mauvais	2.7	1100 %	Banlieue	Saint Génies 15 km
Gênant	1.8	400 %	grande banlieue	Pibrac 25 km
Peu gênant	0.8	100 %	campagne	Saint Caprais 50 km
A peine détectable	0.1	10 %	site isolé/campagne	Saint Cricq(32) 80 km Marut 150 km
Non	0.02	2%	site très isolé	-

délectable

- calculé à l'aide de la loi de Walker .

La figure 1 présente un gabarit type que l'on peut graduer en kilomètres . Notez que le programme THOT calcule automatique ces zones soit par ville , région et pays et les reporte directement sur des cartes (voir chapitre 11.3).

2.5 APPLICATIONS

2.5.1. INFLUENCE DE LA DISTANCE ET DU TEMPS

Nous pouvons appliquer directement notre modèle sur des questions très concrètes .Par exemple : « comment évolue dans l'espace et le temps la distance à laquelle une ville donnée n'engendre plus ou peu de nuisances.

Je présente ici 4 cas : Paris , Toulouse , Rodez , Blois . Mais vous pouvez réaliser le meme exercice avec votre ville à l'aide du programme THOT.

La planche 2 présente les résultats . Plusieurs remarques s'imposent :

- En abscisse il y a les années et en ordonnées la distance ville / observateur.
- sur chaque figure sont représentées 2 courbes . Une correspond à la distance ou le halo de la ville est peu gênant et l'autre ou elle est à peine détectable.
- Pour que les halos de Paris et de Toulouse ne soient plus détectables il faut aller bien loin .(une voire plusieurs centaines de kilomètres). De plus cette distance augmente d'année en année Pour les seuils à peine détectables et peu gênants on doit s'éloigner d'environ 1 kilomètre par an !!!
- Le rapport entre les distances des zones peu gênantes et à peine détectables est d'environ 2.5
- Meme les villes moyennes n'excédant pas quelques kilomètres de diamètre perturbent la campagne environnante sur près de 30 kilomètres.
- Mais le plus inquiétant c'est que ce mouvement semble inexorable .Les zones de nuisances grandissent sans fin et par conséquent les zones saines fondent comme neige au soleil. On sent bien que cette question dépasse le cadre de l'astronomie... Avec quelles conséquences dramatiques sur la faune et la flore ? ? ? ? ? nous sommes dans l'inconnu !!!
- D'autre part plus les villes s'agrandissent plus l'énergie dissipée dans le ciel augmente et plus leur surface augmente . Donc non seulement la luminosité du ciel nocturne augmente mais l'obstruction vue d'un site donné augmente .Il y a couplage et accélération de la nuisance réelle.

2.5.2. APPLICATION A UN PAYS OU UNE REGION

Connaissant les coordonnées géographiques des villes françaises et leur population (base IGN et INSEE) il est possible de déterminer leur zone d'influence sur l'ensemble du territoire.

Inversement on peut savoir pour chaque point du territoire s'il est sous l'influence de telle ou telle ville. Pour une valeur de dégradation donnée , si ce point se trouve à l'intérieur d'un cercle, alors il est influencé. S'il est à l'extérieur du cercle , il n'est pas influencé .

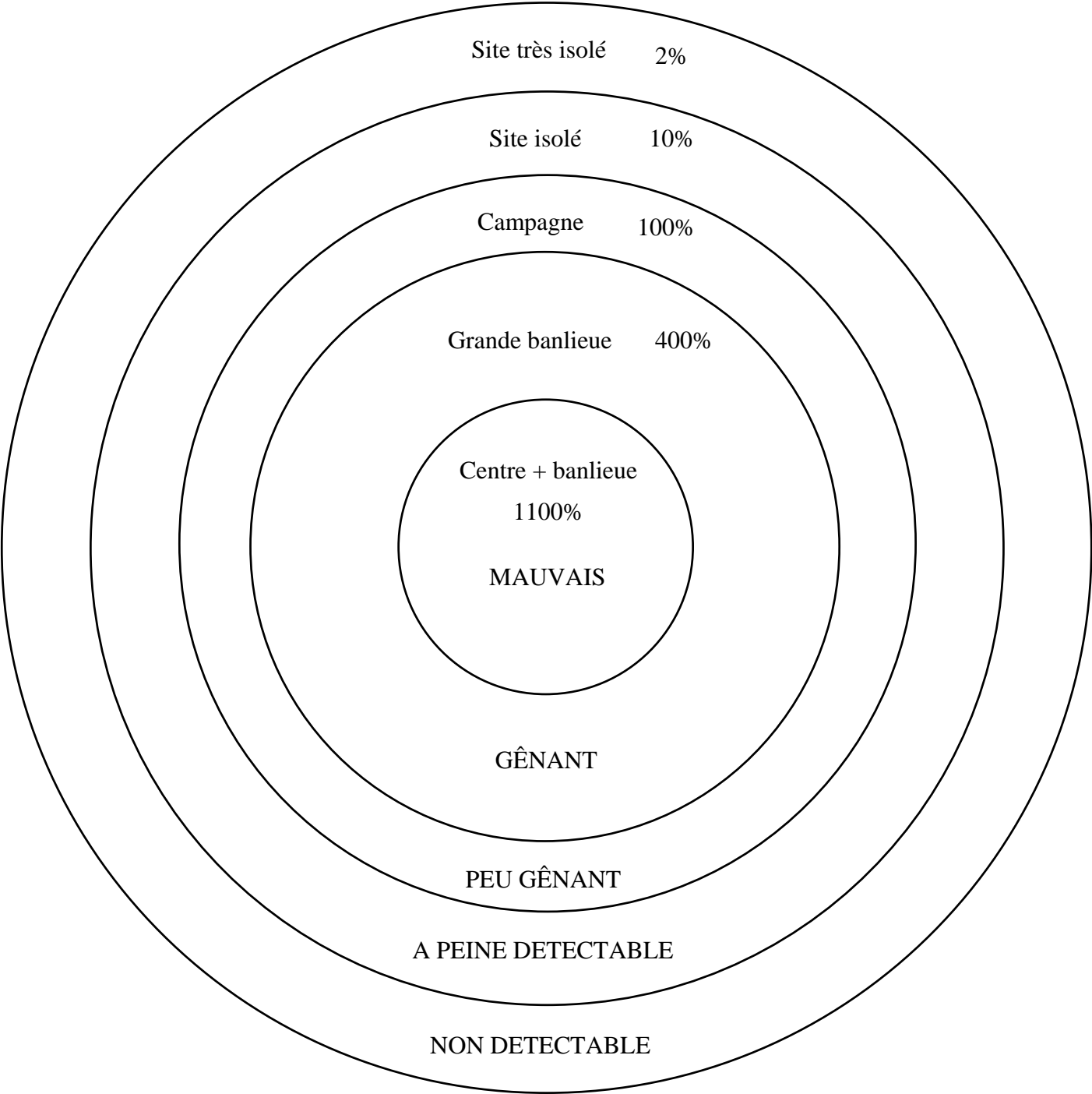
La carte de France présentée figure 3 a été calculée à partir du programme THOT . Le seuil de dégradation est fixé à 10 % (seuil de détection) et on ne prend en compte que les 200 plus grandes villes . Cette option est disponible dans le programme (voir chapitre 11.3).

L'intérêt de ces cartes est de faire ressortir les zones qui ne sont pas sous influence .Ce sont les zones hors des cercles .Pour cet exemple les régions hors des cercles ont été grisées .Elles correspondent aux zones où se trouvent des sites potentiellement exceptionnels .Elles donnent donc une première idée ou chercher des sites intéressants .Pour en savoir plus , il faut analyser plus finement chaque point, tracer la carte de site et calculer l'indice de qualité correspondant.

Tout cela étant in fine confirmé par des observations sur le terrain .Ceci fait l'objet du prochain chapitre.

Autre application après avoir identifier les zones exceptionnelles il faut lutter pour leur sauvegarde en tant que patrimoine ou sauvegarde de la nature. Et peut etre **les faire classer comme cela existe pour les parcs nationaux ou régionaux ou le littoral.**

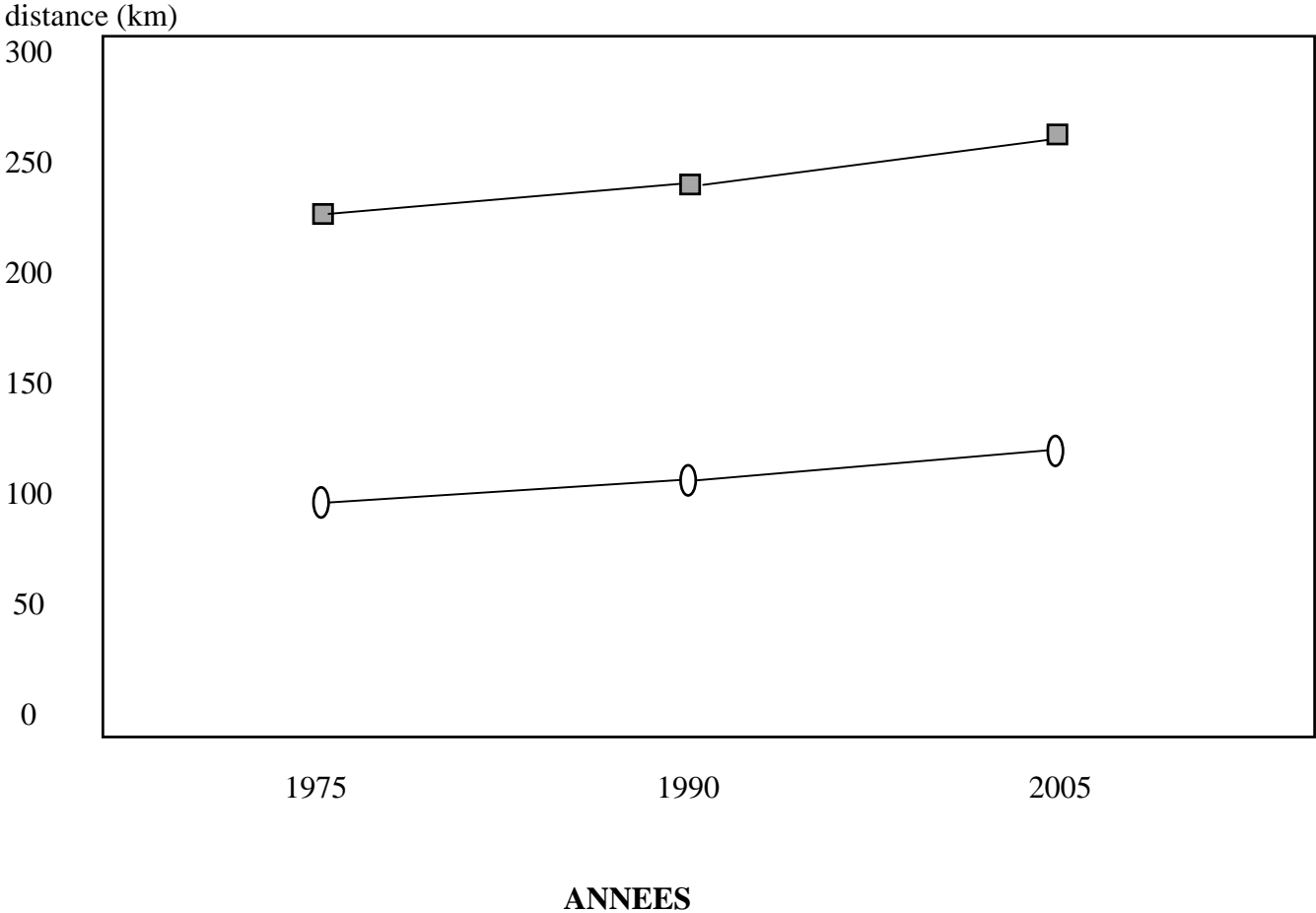
Augmentation relative de la
luminosité du fond de ciel
par rapport à celle du fond
de ciel naturel



ZONE D'INFLUENCE D'UNE AGGLOMERATION

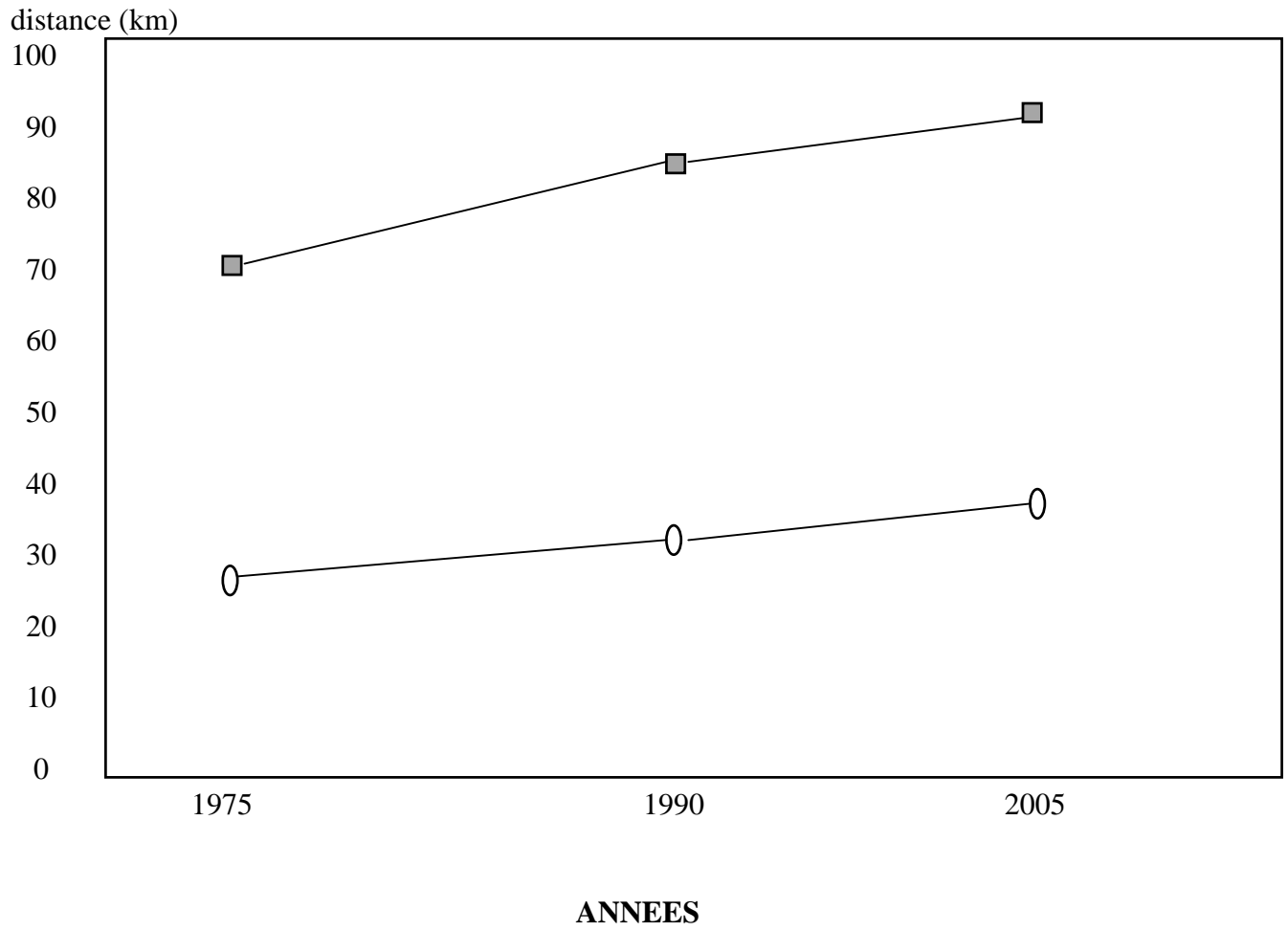
ZONE D'INFLUENCE DE PARIS

■ à peine détectable
○ Peu gênant



ZONE D'INFLUENCE DE TOULOUSE

■ à peine détectable
○ Peu gênant



ZONE D'INFLUENCE DE RODEZ

- à peine détectable
- non détectable
- Peu gênant



ZONE D'INFLUENCE DE BLOIS

- à peine détectable
- non détectable
- peu gênant



3. INDICE DE QUALITE DU CIEL DU POINT DE VUE DE LA POLLUTION LUMINEUSE POUR UN SITE DONNE

3.1 INTRODUCTION

Lorsque l'on observe à partir d'un site donné on voit au loin différentes villes se répartir en azimuts.

La dégradation du site dépendra des paramètres suivants :

- Répartition des villes en azimut
- Population de chaque ville (énergie dissipée vers la ciel)
- Obstruction de chaque ville
- Distance observateur , ville

Il en est de meme pour un ville isolée ; il est possible de déterminer au droit de la ville l'augmentation de luminosité de fond de ciel par rapport au fond de ciel naturel .

Nous obtenons alors pour chaque élévation au dessus de l'horizon une courbe de dégradation qui est fonction de l'azimut.

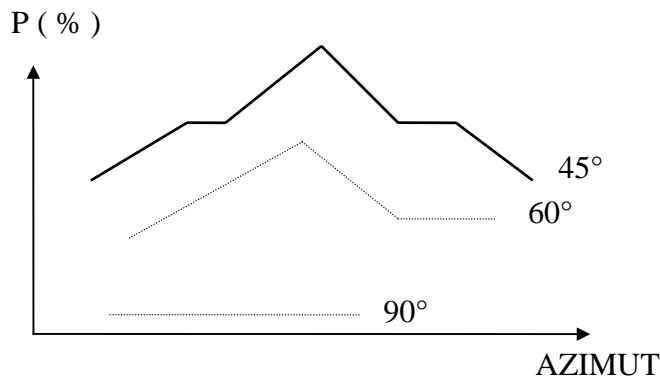
On peut alors calculer l'intégrale sur tout le ciel de l'augmentation de la luminosité du fond de ciel par rapport au fond de ciel naturel .

Ceci correspond bien à l'estimation du flux émis par le ciel du fait de l'énergie lumineuse émise par les villes environnantes. Les développements mathématiques de ce calcul et les hypothèses simplificatrices que j'ai effectuées figurent en annexe .

Il s'agit donc bien d'exprimer et d'estimer un flux perturbateur par rapport à un flux naturel .

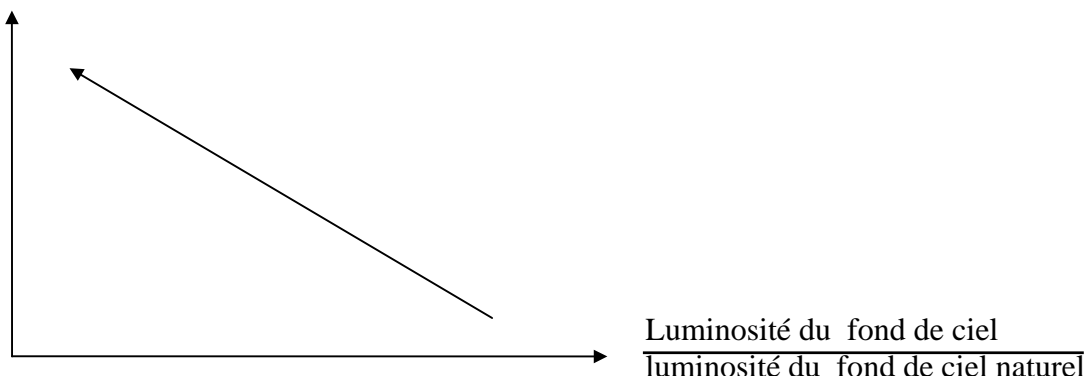
Il s'agit bien d'un indice de qualité .

Si l'on trace ,comme précédemment , l'augmentation relative de la luminosité du fond du ciel par rapport au fond de ciel naturel exprimée soit en pourcentage ,soit en magnitude , en fonction de l'azimut et de l'élévation au dessus de l'horizon on obtient la figure ci dessous :



On peut estimer l'intégrale de l'augmentation de la luminosité du fond du ciel par rapport au fond de ciel naturel sur toute la voute céleste. Si l'on compare alors notre site avec des sites calibrés on voit qu'il est possible de construire une relation indice de qualité ,dégradation du site utilisé .(figure ci dessous).

Qualité du site



Heureusement grace à l'expérimentation l'estimation du flux parasite total peut se réduire à un problème comportant moins de paramètres .Ceci est un débat de spécialistes.(voir les annexes).

La loi de WALKER à été calibrée en figeant l'élévation au dessus de l'horizon au droit du plan vertical qui passe par la ville et l'observateur .Cette élévation est de 45 degrés.

Il faut retenir que l'on peut se ramener à une somme finie de halos individuels répartis sur l'horizon .Donc si nous avons N villes réparties sur l'horizon il suffit d'appliquer N fois le modèle de WALKER .Tout simplement, nous décomposons le problème en N sources individuelles.

3.2 ETABLISSEMENT DES CARTES DES SITES

Pour chaque site, il est possible de raisonner en **coordonnées polaires** :

- l'origine étant l'observateur
- le zénith un axe
- Si l'on tourne sur soi-même, on se pointera simultanément vers l'Est, puis au Sud, à l'Ouest et au Nord (angle d'azimut)

On peut ainsi repérer chaque ville par sa distance et son angle d'azimut mais aussi son obstruction.. (figure 4).

D'autre part il est possible de définir une fonction qui relie obstruction et augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport à celle du fond de ciel . J'ai appelé cette **fonction caractéristique de l'azimut pour le site considéré.**

Elle est définie comme suit . J'applique sur toute l'obstruction de la ville (vue du site) la valeur que me donne le modèle de WALKER. (augmentation relative du fond de ciel par rapport au fond de ciel naturel à 45 degrés au dessus de l'horizon). (figure 6)

Autre avantage je fais apparaître implicitement la notion de flux lumineux(ou flux d'énergie) .Le flux a des propriétés mathématiques plus intéressantes que la luminosité . (voir annexes) .

J'obtiens donc dans mon diagramme de départ (Azimut , Augmentation relative du fond de ciel) un rectangle dont les longueurs des cotés sont l'obstruction et l'augmentation relative de la luminosité du fond de ciel par rapport au fond de ciel naturel pour la ville considérée. (figure 5)

Cette représentation est fondamentale car elle exprime directement la notion de flux d'énergie parasite apporté par la ville au site . En effet plus la surface de ce rectangle est petite plus la perturbation est faible. Donc pour un site donné plus la surface occupée par les rectangles est grande , plus le site est dégradé .Inversement plus cette surface est petite plus le site est pur.

On peut généraliser ce raisonnement à toutes les villes qui entourent le site . En sommant la surface de tous les rectangles obtenus on obtient une valeur proportionnelle à l'énergie totale parasite dissipée sur la voute céleste par les villes environnantes. (voir annexes) . La surface totale de tous les rectangles est une valeur qui caractérise le site . Je l'ai appelée **valeur caractéristique globale du site.**

Nous venons de créer un indicateur de qualité du site . Plus cet indicateur est élevé plus le site est dégradé.

Si l'on connaît de surcroît la population de la ville concernée, on peut tracer l'horizon que l'on observerait sur ce site et calculer la dégradation du fond du ciel défini par la loi de WALKER en fonction de l'azimut (figure 6) . J'ai nommé cette fonction la fonction caractéristique du site .Cette fonction est unique est caractérise le site. Pratiquement la base de données implantée dans le programme THOT fournit tous les éléments pour calculer cette fonction .

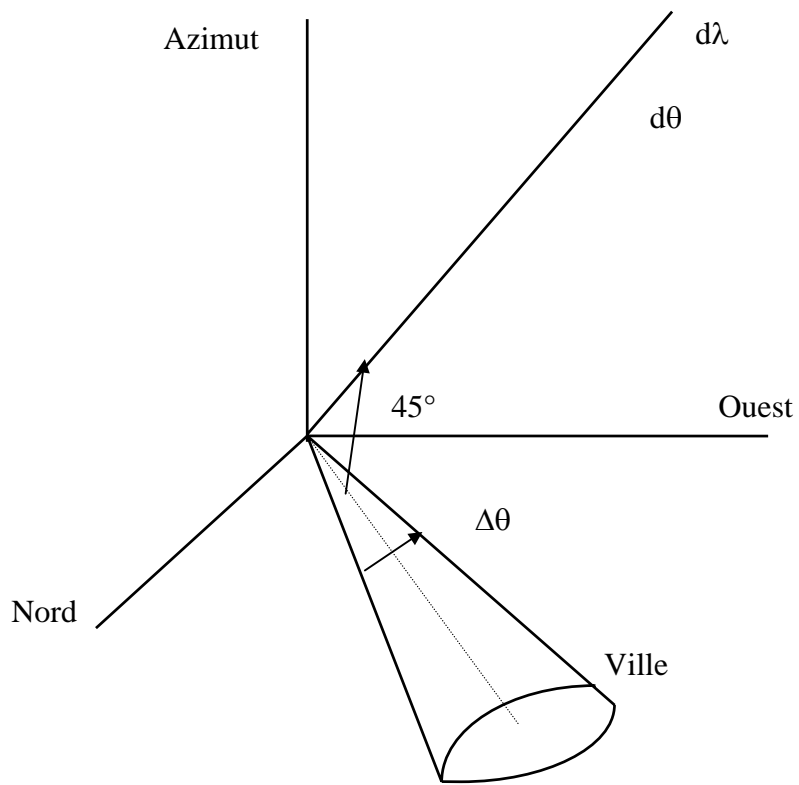


Figure 4

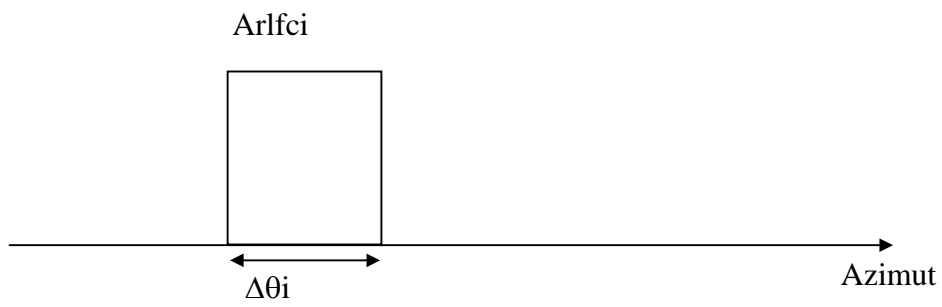
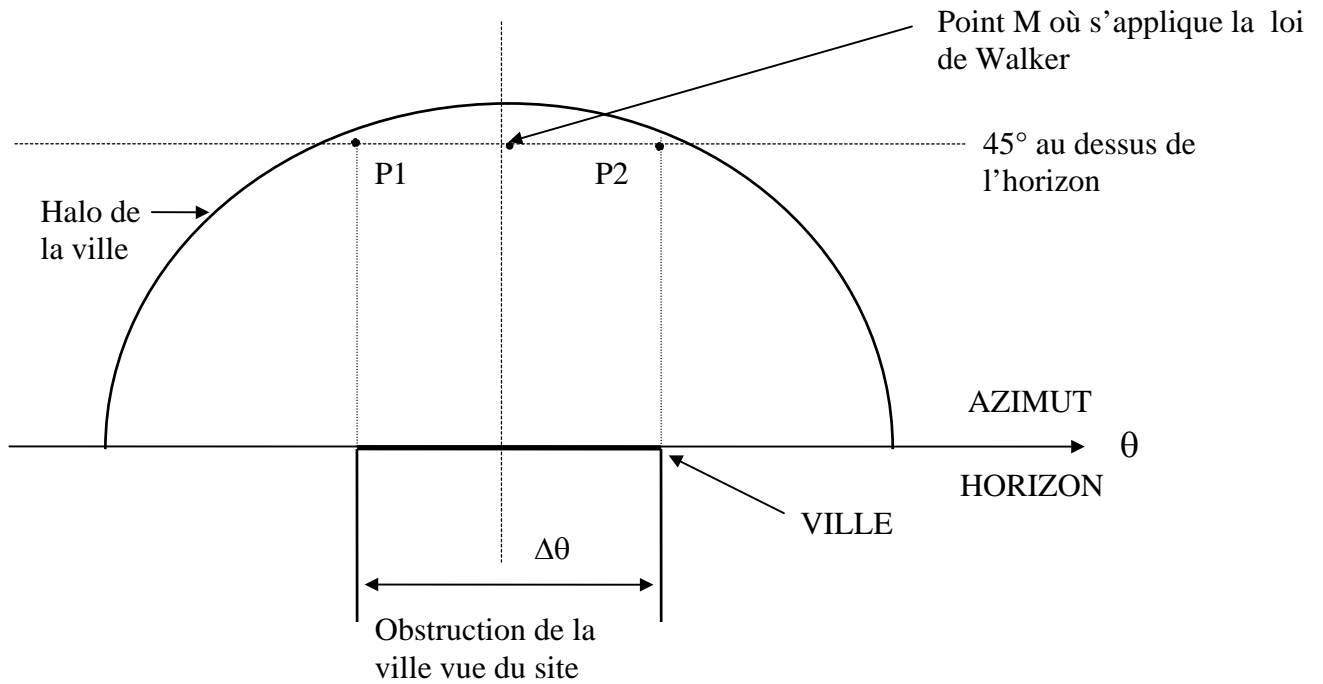


Figure 5

VILLE VUE DEPUIS LE SITE A ETUDIER

Définitions :



En M : $Arlfc_M$ = augmentation relative de la luminosité du fond de ciel

Par définition : on applique de P1 à P2 $Arlfc_{P1P2} = Arlfc_M$

Par définition : fonction caractéristique pour l'azimut θ

$$f_{\theta} = Arlfc \times \Delta\theta$$

→ valeur caractéristique globale du site
 $(\forall \text{azimut}) f_T = \sum_{i=1}^n f_{\theta}$

Figure 6

LES INDICES DE SITES (du point de vue de la pollution lumineuse)

4.1 POURQUOI UN INDICE ?

A l'heure actuelle aucun outil incontestable ne donne l'état de la qualité du ciel des sites d'observation du point de vue de la pollution lumineuse . Il n'existe aucun classement ni échelle des sites . De plus personne ne sait prévoir de manière précise comment va évoluer la qualité des sites dans l'avenir. Nous avons du mal à définir les sites prioritaires et donc à les préserver.

Quelle démarche m'a conduit à développer et à proposer cet indice de qualité .

Le premier avantage est de normaliser les échanges techniques et scientifiques. Tout le monde parle le même langage sans ambiguïté . Une norme scientifiquement incontestable est définie , discutée , vérifiée expérimentalement puis acceptée . Les choses apparaissent ainsi plus claires pour tout le monde et elle peut être appliquée.

Implicitement il découle de cette norme des catégories de sites (tel site est meilleur que tel autre). Tout individu grâce à cet indice pourra rapidement et globalement savoir si tel site est bon ou mauvais . Par contre les astronomes ont du mal à savoir comment évoluera tel site à long terme et donc s'ils peuvent ou non y investir .

Pour le grand public l'indice sera un indicateur immédiat pour avoir la certitude d'avoir un ciel de qualité inconnu dans les villes .

Il y a là pour les professionnels du tourisme , notamment rural un potentiel énorme de retombées. Il n'y a qu'à voir l'impact de l'indice des plages sur le choix des destinations des vacanciers l'été . A eux de jouer leur rôle . En effet les gens des villes sont de plus en plus demandeurs de rapports simples et directs avec la nature . Le ciel nocturne fait partie du patrimoine du monde rural . Il peut être mis en valeur et médiatisé . La sauvegarde de ce patrimoine implique que les professionnels du tourisme rural prennent conscience de cette richesse placée au-dessus de leur tête .

Une fois identifiées les zones très bonnes voir excellentes il faudra les protéger . Cet indice et les cartes qui y seront associées sont une base très concrète pour initier des démarches auprès de politiques , d'institutions ou d'établissements reconnus (DRIRE , EUROPE, Parc régionaux et nationaux , ADEME.....). Le chantier est immense mais créateur de richesses durables .

L'impact auprès du grand public peut être important . On est toujours sensible à ce qui nous touche de près . C'est la fameuse règle de « proximité » que tout journaliste connaît bien . A nous d'imaginer les voies. On peut par exemple pour chaque ville donner l'évolution de l'indice : passé , présent et à venir . On peut aussi estimer l'indice à un instant donné si la France respectait les conventions qu'elle a signées à l'UNESCO . L'impact psychologique serait important surtout s'il était relayé par une campagne cohérente avec preuves et documents à l'appui .

La réduction des « poches » « sites très bon voire exceptionnels » dans le temps aura aussi un impact très fort car là on joue sur le registre sauvegarde de l'environnement et du patrimoine naturel.

D'autre part avoir un indice normalisé simplifiera grandement les discussions avec les services et institutions techniques de l'Etat . Il permettra notamment de fixer des objectifs concrets et vérifiables avec un échéancier précis et réaliste.

4.2 BASE TECHNIQUE DE L'INDICE

4.1.1 BASE THEORIQUE

*** DEFINITIONS :**

Pour un site donné nous avons établi (voir chapitre 3.2) la relation existant entre l'intégrale des flux d'énergie lumineuse qui pollue la voûte céleste vue du site et la qualité intrinsèque du site.(fonction caractéristique du site).

Si l'on divise cette intégrale par celle du fond de ciel naturel sur toute la voûte céleste on obtient un indice global sans dimension qui quantifie rigoureusement la nuisance due à la pollution lumineuse . (voir les annexes) .

C'est par définition l'indice global de qualité du fond de ciel du site considéré (du point de vue de la pollution lumineuse) .

Nous avons établi un indicateur lié d'une manière biunivoque (et croissante) à la dégradation des sites . Les développements numériques et mathématiques , ainsi que les hypothèses que j'ai retenues sont présentés en annexe. Il est évident qu'il s'agit là d'un premier modèle et que ,suite aux remarques et travaux à venir ce modèle s'affinera .

L'étape suivante est l'établissement d'un note dite **NOTE DE QUALITE** du site (du point de vue de la pollution lumineuse) .

*** ETABLISSEMENT DE LA RELATION INDICE , NOTE:**

Là on repasse à l'expérimentation. Il s'agit en fait de raisonner par rapport à des sites de référence qui ont été calibrés par des astronomes expérimentés . En fait on compare des sites entre eux .

On dit qu'il faut calibrer la loi (indice globale de qualité de site , note de qualité du site) . Cet exercice de calibration est difficile. Il ne peut être confié qu'à des observateurs très expérimentés . C'est un processus itératif qui passe par la redoutable sanction comparaison du modèle et de la mesure sur le terrain. C'est un processus long et itératif , sans concession qui s'affine au fur et à mesure que l'expérience s'accumule . On passe du monde du mathématicien (théorique) à la science de l'ingénieur et du physicien .(monde polynomial ou l'on recalc intelligemment les lois du modèle pour représenter fidèlement la nature). En aéronautique on connaît bien ce processus .Il fait des miracles ! . La méthode utilisée est développée en annexe.

L'idée maîtresse est la suivante :

On effectue des mesures sur le terrain avec un protocole immuable , précis et validé. On compare les mesures obtenues au modèle disponible (THOT par exemple) . On compare. On obtient des écarts .On analyse et on identifie ces écarts .C'est la phase la plus difficile. On synthétise et modélise intelligemment ces écarts . On corrige le modèle en tenant compte de ces écarts . On obtient donc un modèle recalé .On redépouille les campagnes d'observations précédentes .On obtient à nouveaux des écarts qui doivent être minimales . On réanalyse ces écarts. Le système doit converger globalement vers zéro rapidement (une voire deux itérations).Sinon il apparaît que quelque chose qui n'a pas été compris .Il faut refaire le modèle ou exprimer des réserves en diminuant le champ d'application .

Les mesures seront visuelles , photographiques ou photométriques (CCD , photomètre).

Le modèle actuel (modèle de WALKER) est basé sur des mesures photométriques . La loi de référence actuelle ,indice note ,est basée sur des mesures visuelles effectuées par une équipe toulousaine avec un protocole bien défini mais améliorable (voir plus bas).

A.Klotz et D.Salabert de la faculté des sciences de RANGUEIL à Toulouse ont effectués des travaux en CCD très remarquables (voir chapitre 11.2 et annexes) en vue d'établir un protocole bien plus fin et plus fiable.

Il ne faut pas perdre de vue que le modèle développé actuellement ne tient compte que de la population et ses effets induits . D'autres effets comme les axes de circulation , les lazars , centres commerciaux , zones d'activité

, monuments éclairés...peuvent très lourdement dégrader un site . Pour cela seules des mesures et images sur le terrain ou aériennes ou satellitaires peuvent permettre de progresser .

* MODELE NUMERIQUE DEVELOPPE :

Le modèle informatique utilisé est le programme THOT , que je développe . Le calcul de l'indice global de site et des fonctions caractéristiques a été implanté .

Le programme THOT fait l'objet d'une présentation complète (chapitre 11.3) .C'est un outil facilement utilisable ,sur n'importe quel PC .Il tourne sous DOS et WINDOWS .De plus il est très compact , une disquette suffit . De plus c'est un SHAREWARE .

Le programme THOT comporte une base de données très importante ,utilisable et évolutive comportant les informations suivantes :

* géographique : la position de plus de 5000 villes françaises et 20000 villes dans le monde.

* démographique (base INSEE 1962 , 1990 , prévisions) :3000 villes françaises et les 36000 communes françaises recensées en 1990 .

A l'aide de ces banques de données chaque utilisateur peut notamment calculer l'indice de son propre site .Il pourra alors le comparer à ceux qui sont pré-calculés et qui ont servi à déterminer la loi de référence .

4.1.2 CALIBRATION DE LA LOI (indice global de qualité , Note de qualité de site)

A l'aide du programme THOT pour chaque site retenu j'ai modélisé et établi un indice global de qualité .Ceci m'a permis d'estimer pour chaque site un indice théorique.

*** PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION :**

Pour la première itération 3 observateurs expérimentés (Mr .MOSSER ,.RIEUGNIE , HOFFER) et moi meme avons estimé les sites à partir d'un protocole précis.

Cette campagne était uniquement visuelle .

Les notes vont de 0 pour les sites très mauvais à 10 pour les sites exceptionnels.

Il s'agissait d'établir des critères basés d'une part sur l'observation à l'œil nu des objets étendus , (voie lactée objet Messier et IC) .et d'autre part à l'aide de cartes de champs (style campagne ATLAS) d'estimer les magnitudes limites visibles à l'œil nu.

Pour chaque activité une note est proposée à l'observateur. A titre informatif l'observateur donne une note globale au site Il n'y a pas de délai de réponse et l'observateur peut utiliser le nombre de nuits qu'il désire . Donc pour nous résumer les notes seront déterminées comme suit:

■ Critère de visibilité à l'œil nu :

1) observation des objets étendus

- | | |
|------------------------------------|-----|
| ■ Voie lactée | Nvl |
| ■ Objets célestes (IC, Messier...) | Nob |

2) Estimation de la magnitude limite Nml

Sélection d'étoiles de références dans des constellations appropriées.

Pour un site la note est donnée par la combinaison des 3 notes précédentes et en plus comme complément une note globale est donnée par l'observateur .

La procédure mise au point et utilisée lors de cette campagne est présentée en annexe .

La réduction des observations est difficile car il faut notamment s'affranchir des conditions météo , de l'équation personnelle de l'observateur .Une des solutions consiste à multiplier les observations sur un meme site et les faire refaire par un autre observateur expérimenté .

*** CHOIX DES SITES :**

Le but est de calibrer la loi (indice ,note) .Pour cela , pour la première itération il faut noter les sites sur le terrain . .Nous avons choisi 5 sites bien connus de chacun des 4 observateurs (voir la carte figure 7) .

Ces sites sont répartis uniformément sur la loi à calibrer :

1 en banlieue (de Toulouse) :	Saint genies bellevue
1 en grande banlieue (de Toulouse)	Pibrac
2 en campagne (50 km Est de Toulouse)	St Caprais
(60 km Ouest de Toulouse)	St Cricq
1 site isolé en Aveyron (Aveyron)	Mur de Barrez

*** COMPARAISON MODELE / MESURE :**

La relation entre l'indice qualité de site et la note que j'ai programmée actuellement dans le programme THOT est de type polynomiale . On peut comparer les mesures au modèle .

La figure 8 donne les indices et les notes théoriques obtenues par les sites retenus en utilisant la première (loi indice , site) que j'ai estimée . La note issue de la première campagne de mesures est comparée aux notes théoriques obtenues (figure 9) .

On voit qu'en banlieue (sites très dégradés) la loi n'est pas correcte . Par contre cette première loi semble bien calibrée ailleurs .Il semble malgré tout que pour les très bons sites elle ait du mal à différencier et hiérarchiser . Tout ceci veut dire qu'il faut encore travailler pour figer cette loi .Mais pour un premier exercice les résultats sont très encourageants .

4.3 UTILISATION DE L'INDICE ET DE LA NOTE DE SITE :

Nous avons établi un modèle cohérent pour évaluer la dégradation des sites du point de vue de la pollution lumineuse. De plus ce modèle est globalement recalé par l'expérience . On peut alors faire des variations autour des données de base du modèle .Il faut cependant rester modeste . Il faudra encore d'autres campagnes d'observations , avec des mesures très précises (CCD ...) avant de le valider parfaitement .

Toutefois on peut déjà mettre en évidence des tendances. En se basant sur les données démographiques on peut faire varier la population d'une ou des villes dans le temps. D'autre part la position géographique étant connue on peut visualiser l'évolution des zones d'influence dans le temps ainsi que l'indice de qualité et la note de n'importe quel site (Planches 10) .

Les utilisations sont très nombreuses . On peut aussi se demander : « quel serait le niveau de mon site si les conventions de L'UNESCO étaient appliquées. Tout ceci est présenté figure 11 .

Les utilisations sont très nombreuses . Tout ceci est disponible directement avec le programme THOT .

5. CONCLUSIONS

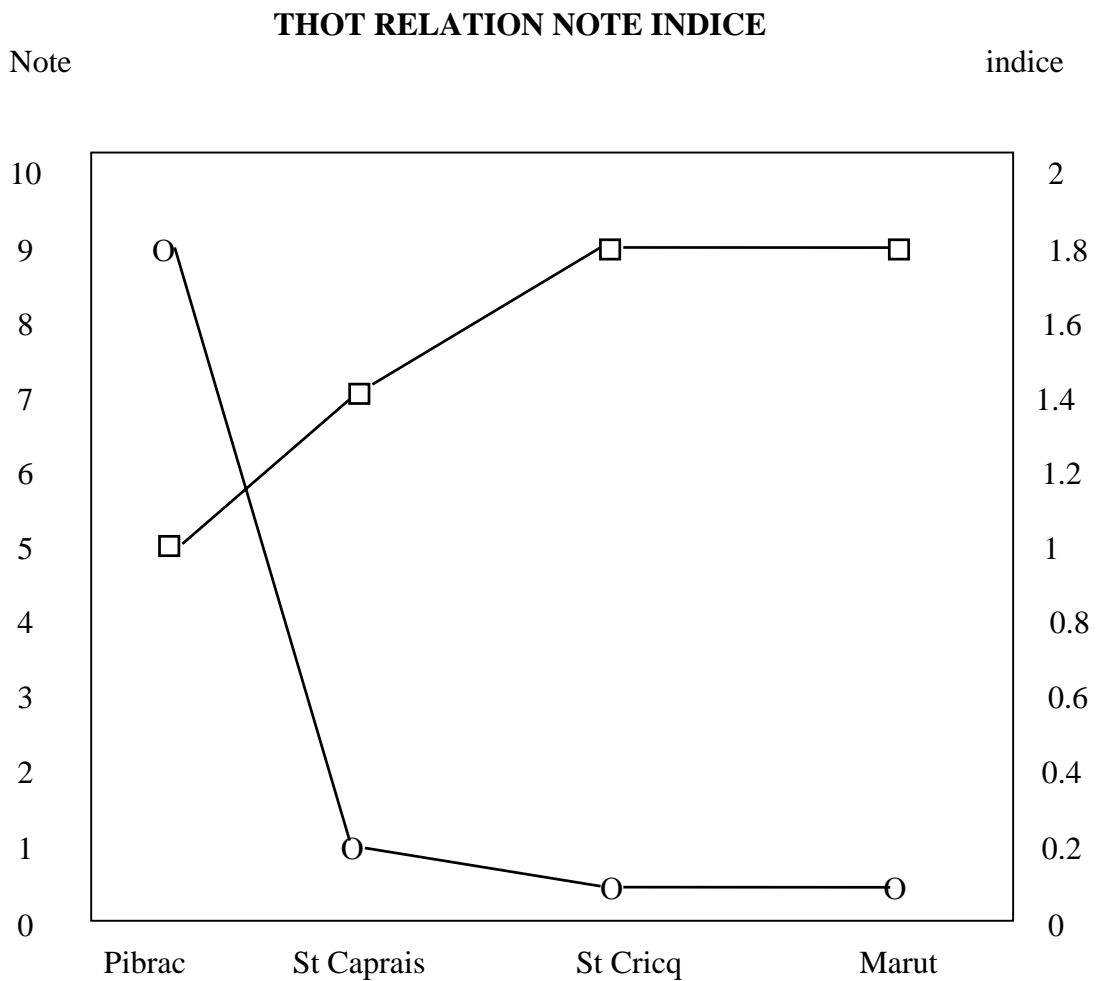
Nous avons donc établi un indice de qualité qui reflète le niveau de dégradation d'un site du point de vue de la pollution lumineuse. Il est d'autre part possible de coupler cet indice à une note .

Même si le travail qui reste à faire pour calibrer et valider ces études est important nous avons là un outil que chacun peut utiliser à sa guise .Reste à affiner les résultats puis à l'appliquer notamment pour identifier et sauvegarder les sites sensibles , et pour la création d'un indice de pollution du ciel comme il en existe actuellement pour les plages , l'air ou l'eau .

Merci de votre attention et de vos remarques .

○ = indice

□ = note



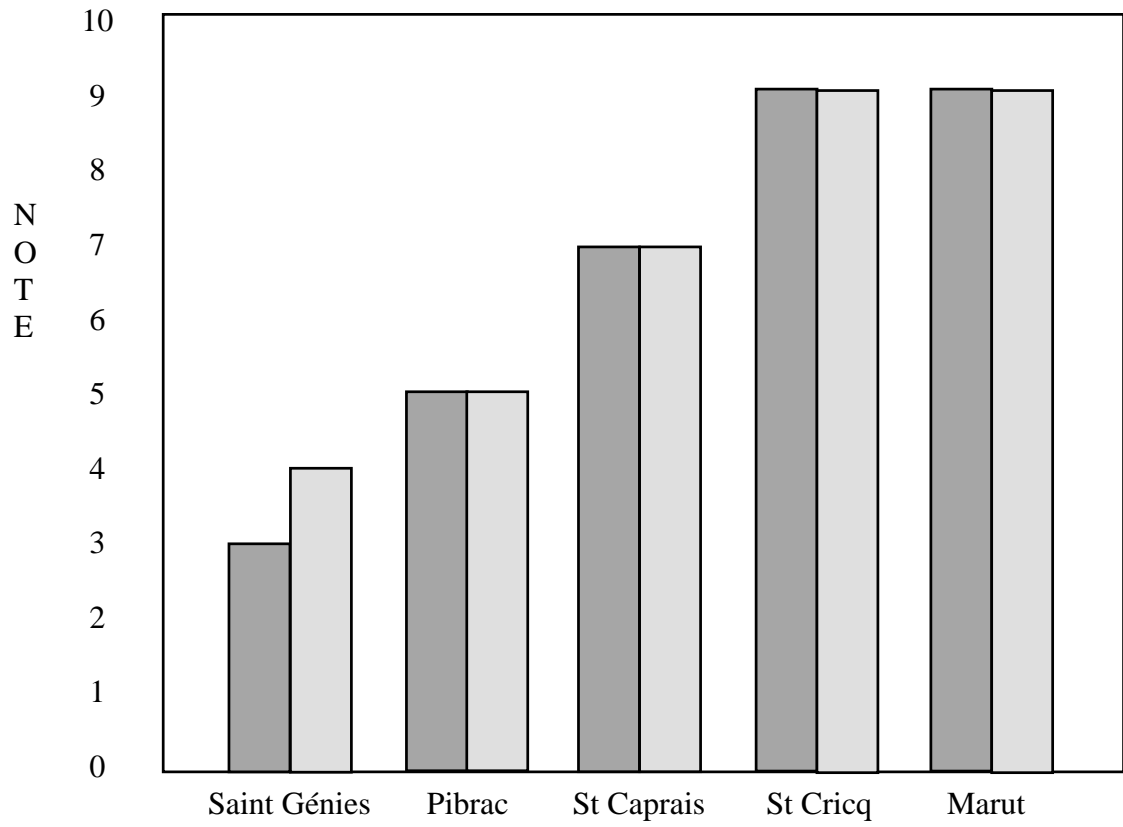
Pibrac : Haute-Garonne (grande banlieue)



St Caprais : Tarn (campagne)

Saint Cricq : Gers (campagne)

Marut : Aveyron (site isolé)

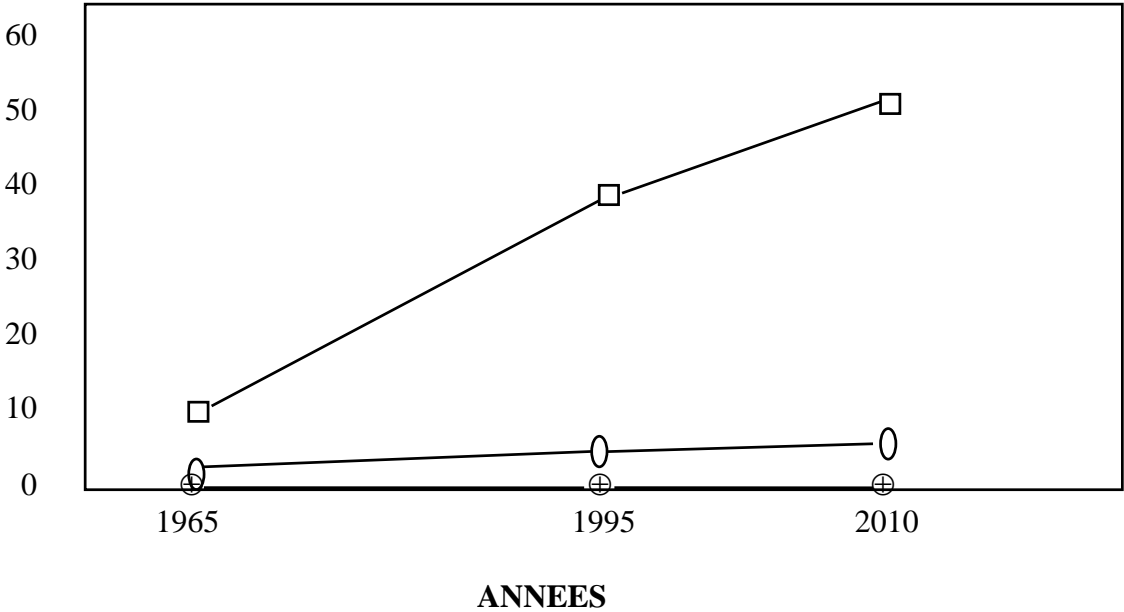
COMPARAISON MODELE : OBSERVATIONS



 Thot 2.0
 VISUEL

INDICE EN FONCTION DU TEMPS

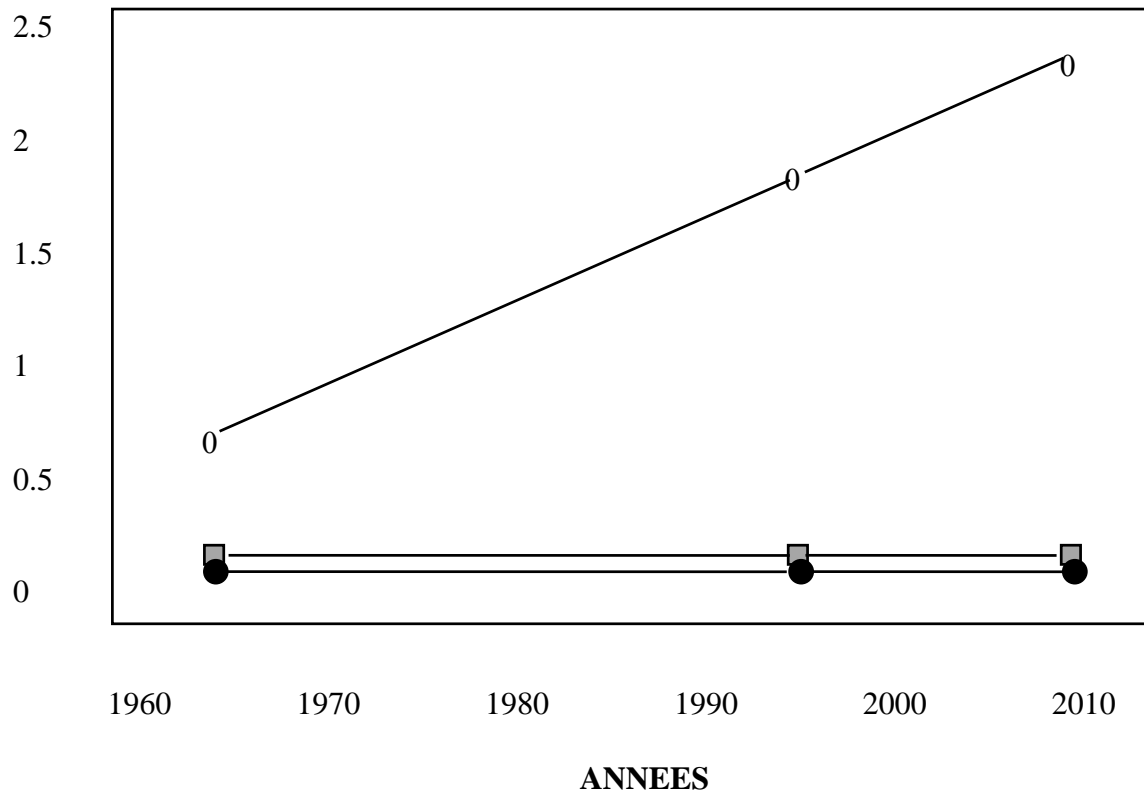
Indice global



- Saint Génies
- Pibrac / Saint Caprais
- ⊕ Saint Cricq / Marut

INDICE FONCTION DU TEMPS

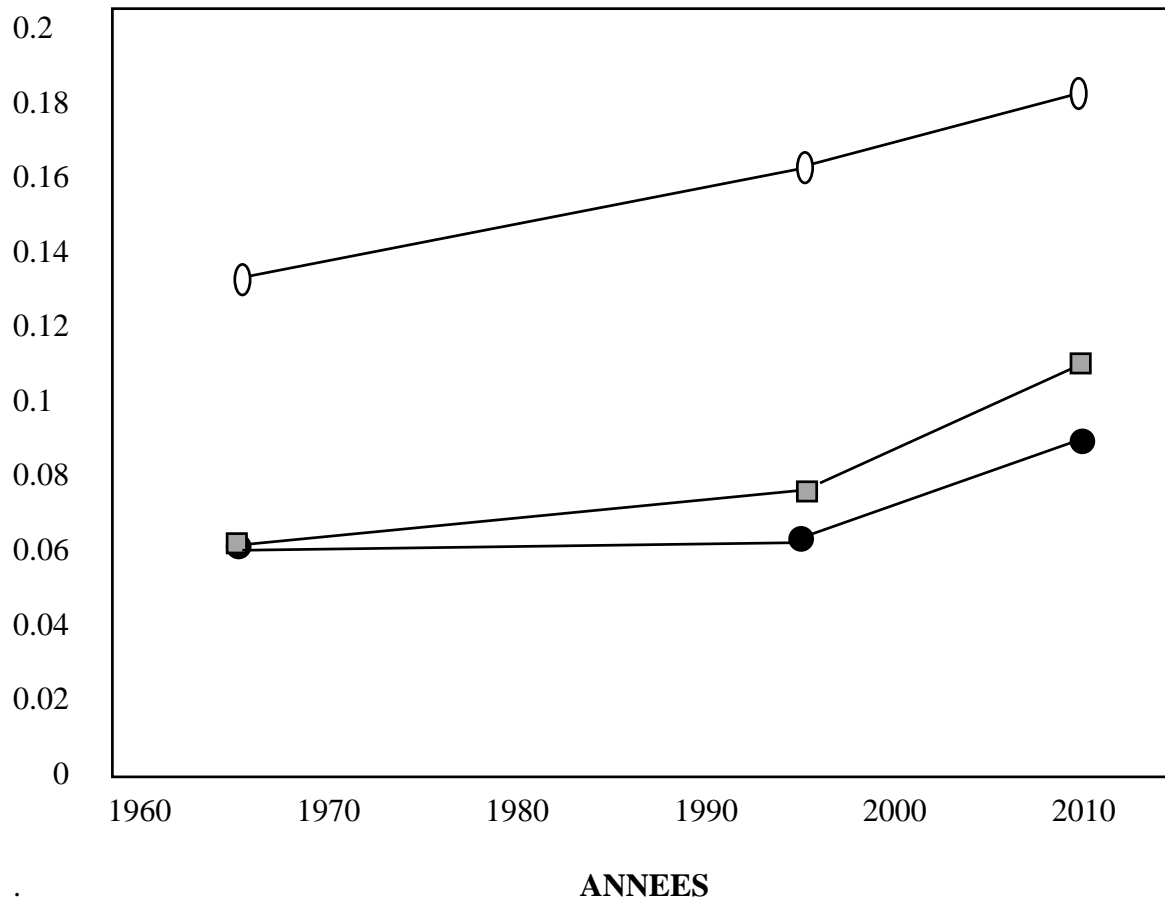
Indice global



- Pibrac
- ◻ Saint Caprais
- Saint Cricq / Marut

INDICE GLOBAL EN FONCTION DU TEMPS

Indice global

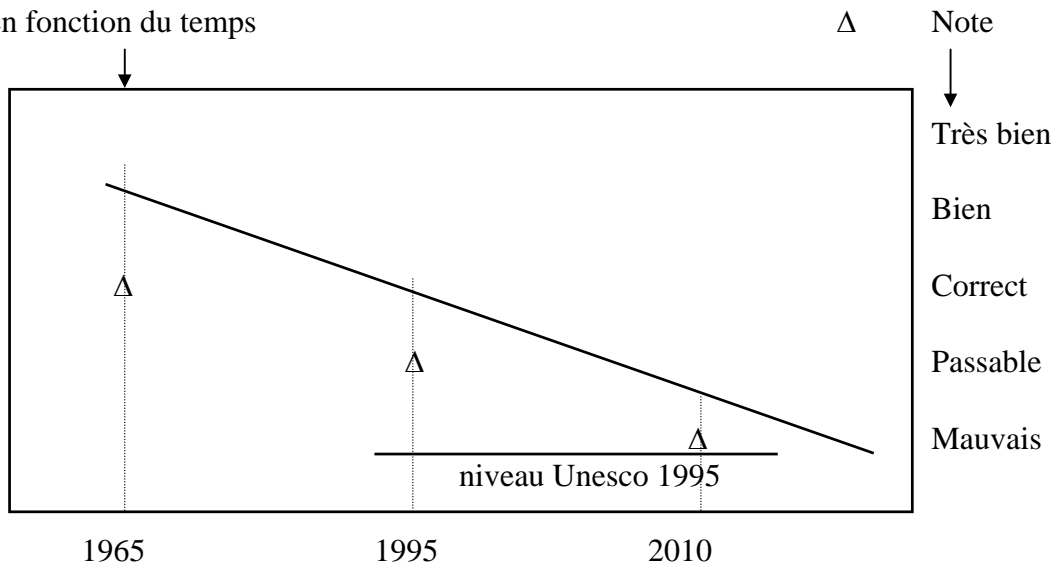


- Saint Caprais
- Saint Cricq
- Marut

POUR UN SITE DONNE
DEGRADATION DU CIEL

Indice

évolution de l'indice
en fonction du temps



INTERVENTION DE MICHEL BONAVIDACOLA

ANNEXE 1 DE L'EXPOSE DE M. BONAVIDACOLA

RODEZ 1998

INDICE DE SITE DU POINT DE VUE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

Glossaire :

ArLfc : augmentation relative de la luminosité du fond de ciel

Lfc : luminosité du fond de ciel

Lfcn : Luminosité du fond de ciel naturel
4 cd/m² soit 21.6 mag/sec d'arc²

θ_i : azimut de la ville (en °)

$\Delta\theta_i$: obstruction de la ville vue du site (en °)

n : nombre de villes (ou halos) vues depuis le site

f(θ_i) : fonction caractéristique de l'azimut θ_i (pour le site considéré à 45°)

Luminosité du fond de ciel :

Lfc : $\Delta Lfc + Lfcn$

Augmentation relative de la luminosité du fond de ciel :

$$ArLfc = \frac{Lfc - Lfcn}{Lfcn}$$

ArLfc = Loi de Walker

(1) $Lfc = Lfcn \times (1 + ArLfc)$

*INDICE DE QUALITE
DU POINT DE VUE DE LA POLLUTION LUMINEUSE*

$$q = \frac{\text{Luminosité du fond de ciel du site (sur tout l'horizon) à } 45^\circ *}{\text{Luminosité du fond de ciel naturel à } 45^\circ \text{ (sur tout l'horizon)}}$$

(* 45° au-dessus de l'horizon)

Hypothèses simplificatrices :

Pour l'azimut θ_i , on pose par définition : $f(\theta) = ArL_{fci} \times \Delta\theta_i$ est la dégradation (pour une unité de déclinaison $d\lambda$). (homogène au flux qui dégrade le ciel) $\Delta\theta = K \times f(\theta)$

L_{fc} sur tout l'horizon : on fait la somme des flux lumineux

$L_{fc} = L_{fci}$ dans le halo des villes + L_{fcn} hors du halo des villes

$$L_{fc} = \underbrace{\sum_{i=1}^n L_{fci} \times \Delta\theta_i}_{\text{Halo des villes}} + \underbrace{L_{fcn} \times (360^\circ - \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i)}_{\text{hors halo des villes}}$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n L_{fci} \times \Delta\theta_i}{L_{fcn} \times 360^\circ} + \frac{L_{fcn} \times (360^\circ - \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i)}{L_{fcn} \times 360^\circ}$$

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{L_{fci}}{L_{fcn}} \times \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ} + \frac{L_{fcn}}{L_{fcn} \times 360^\circ} \times (360^\circ - \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i)$$

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{L_{fci}}{L_{fcn}} \times \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ} + 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ}$$

$$q = \sum_{i=1}^n (1 + ArL_{fci}) \times \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ} + 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ}$$

car $\frac{L_{fci}}{L_{fcn}} = 1 + ArL_{fci}$ voir (1)

$$q = 1 + \sum_{i=1}^n ArL_{fci} \times \frac{\Delta\theta_i}{360^\circ}$$

Indice de qualité du site

$\Delta\theta_i$ = obstruction en °

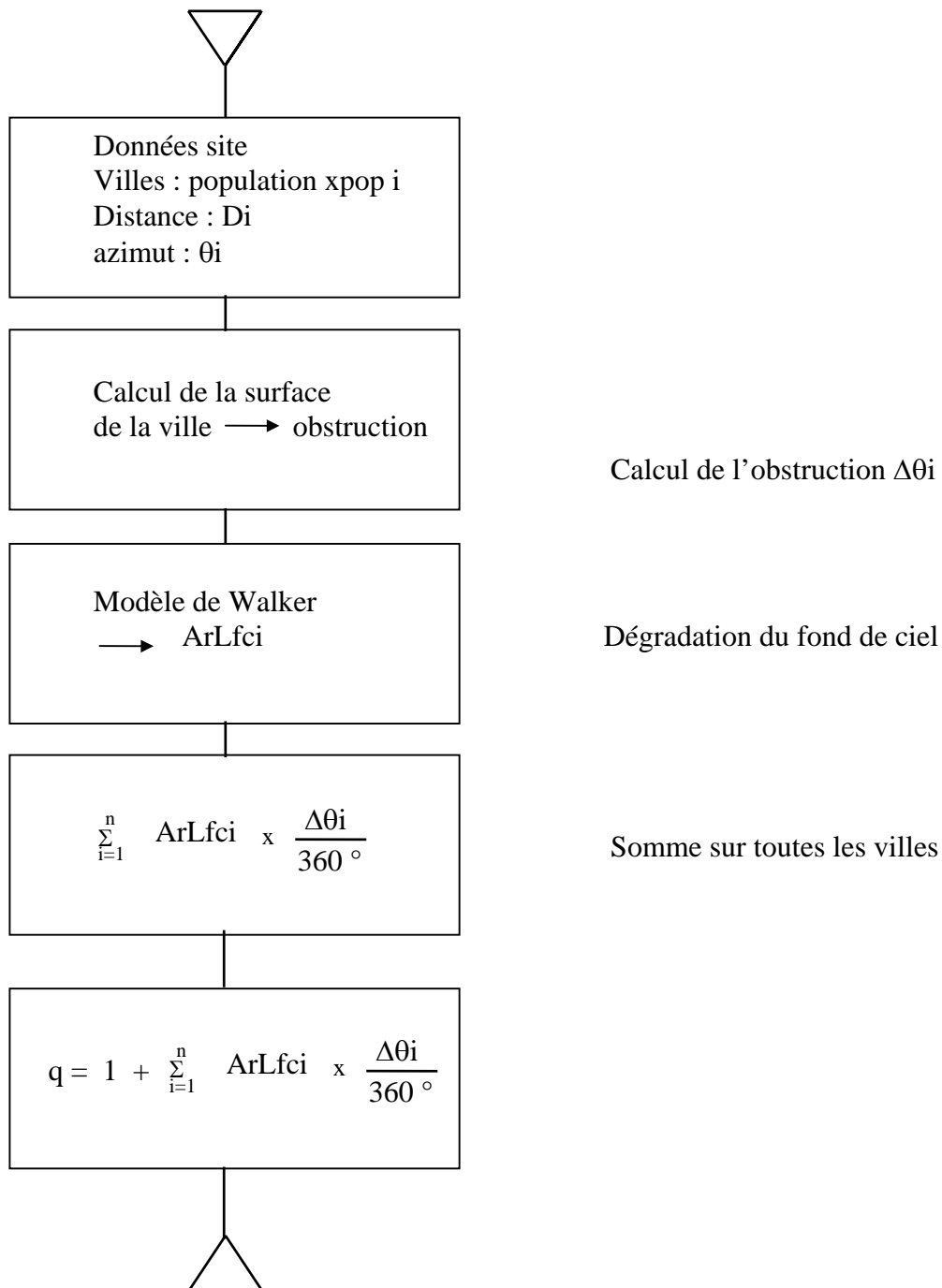
i = indice de la ville

ArL_{fci} = fonction (population / et distance \longrightarrow Walker

n = nombre total de villes

q = est sans dimension

Pour un site donné
CALCUL DE L'INDICE DE QUALITE DU FOND DE CIEL



Remarque : 1) dans cette première itération seule intervient la population
 2) L'utilisateur peut :

- soit rentrer ses propres données
- soit utiliser les sites déjà programmés
- soit utiliser la banque de données directement

Pour un site donné l'on peut facilement faire varier les paramètres.

