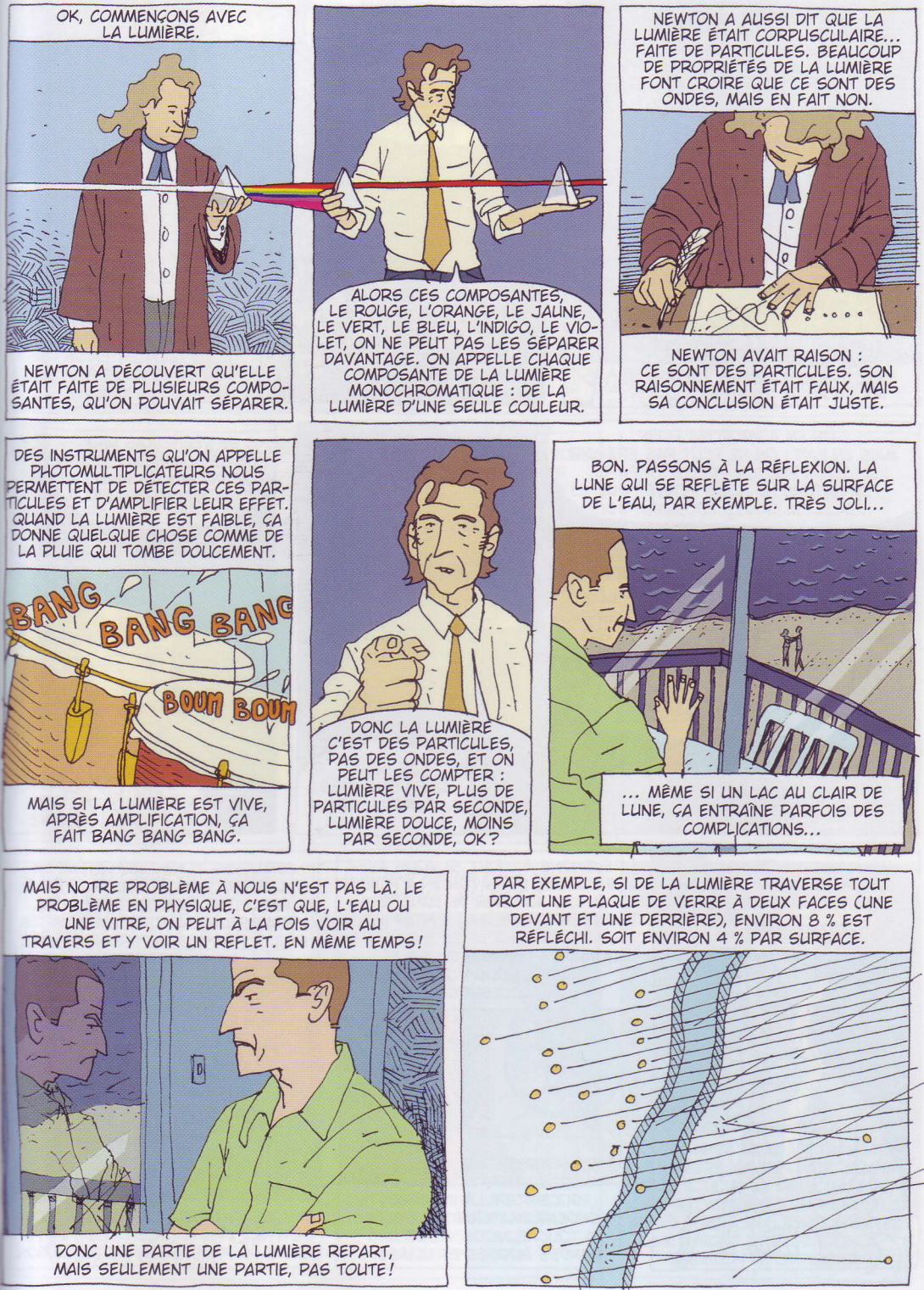
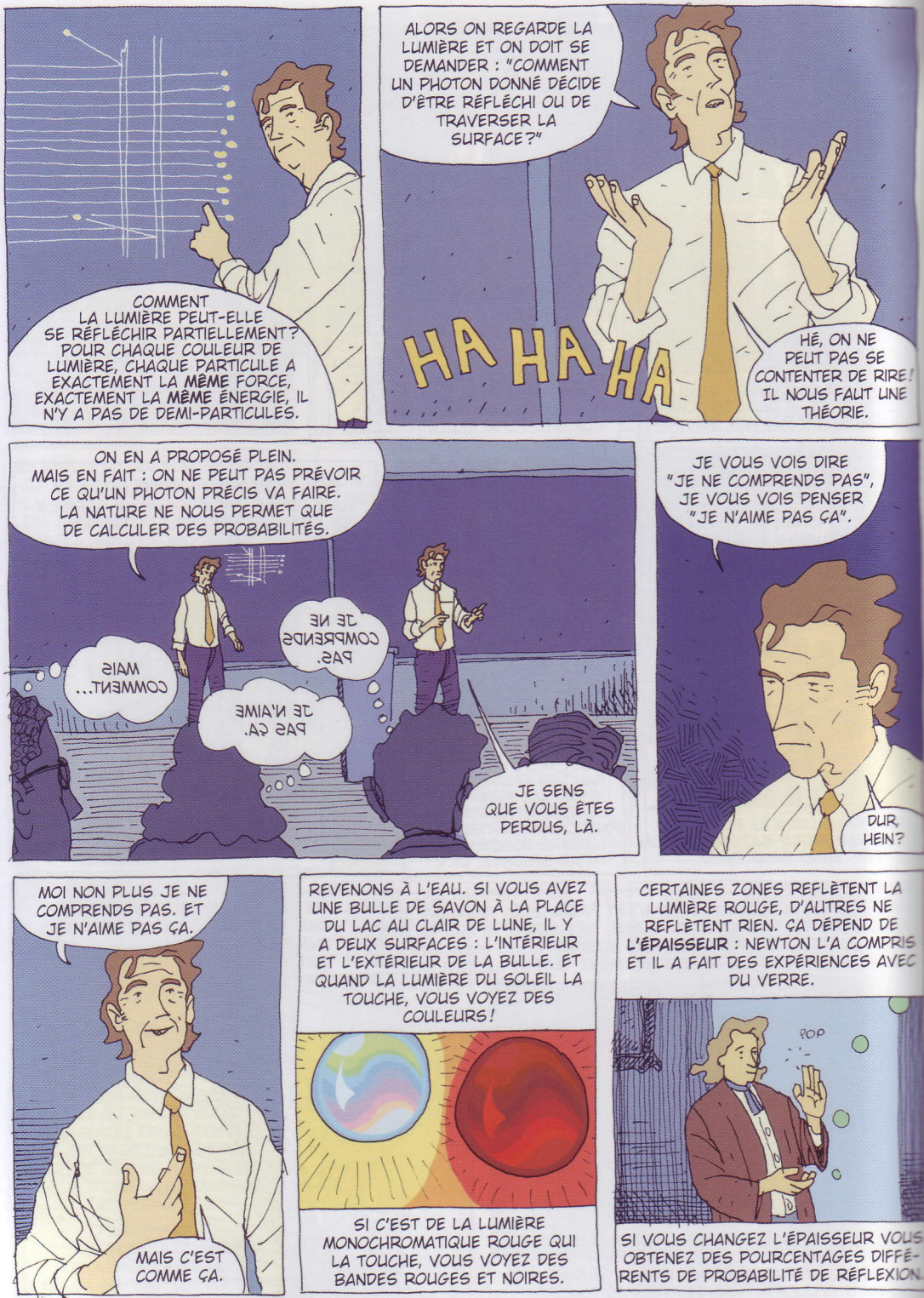
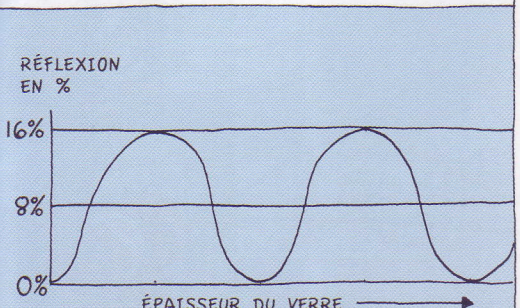

OK, COMMENÇONS AVEC LA LUMIÈRE.
NEWTON A DÉCOUVERT QU'ELLE ÉTAIT FAITE DE PLUSIEURS COMPOSANTES, QU'ON POUVAIT SÉPARER.
ALORS CES COMPOSANTES, LE ROUGE, L'ORANGE, LE JAUNE, LE VERT, LE BLEU, L'INDIGO, LE VIOLET, ON NE PEUT PAS LES SÉPARER DAVANTAGE. ON APPELLE CHAQUE COMPOSANTE DE LA LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE : DE LA LUMIÈRE D'UNE SEULE COULEUR.
NEWTON A AUSSI DIT QUE LA LUMIÈRE ÉTAIT CORPUSCULAIRE... FAITE DE PARTICULES. BEAUCOUP DE PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE FONT CROIRE QUE CE SONT DES ONDES, MAIS EN FAIT NON.
NEWTON AVAIT RAISON : CE SONT DES PARTICULES. SON RAISONNEMENT ÉTAIT FAUX, MAIS SA CONCLUSION ÉTAIT JUSTE.
DES INSTRUMENTS QU'ON APPELLE PHOTOMULTIPLICATEURS NOUS PERMETTENT DE DÉTECTER CES PARTICULES ET D'AMPLIFIER LEUR EFFET. QUAND LA LUMIÈRE EST FAIBLE, ÇA DONNE QUELQUE CHOSE COMME DE LA PLUIE QUI TOMBE DOUCEMENT.
BANG BANG BANG
BOUM BOUM
MAIS SI LA LUMIÈRE EST VIVE, APRÈS AMPLIFICATION, ÇA FAIT BANG BANG BANG.
DONC LA LUMIÈRE C'EST DES PARTICULES, PAS DES ONDES, ET ON PEUT LES COMPTER : LUMIÈRE VIVE, PLUS DE PARTICULES PAR SECONDE, LUMIÈRE DOUCE, MOINS PAR SECONDE, OK ?
BON. PASSONS À LA RÉFLEXION. LA LUNE QUI SE REFLÈTE SUR LA SURFACE DE L'EAU, PAR EXEMPLE. TRÈS JOLI...
... MÊME SI UN LAC AU CLAIR DE LUNE, ÇA ENTRAÎNE PARFOIS DES COMPLICATIONS...
MAIS NOTRE PROBLÈME À NOUS N'EST PAS LÀ. LE PROBLÈME EN PHYSIQUE, C'EST QUE, L'EAU OU UNE VITRE, ON PEUT À LA FOIS VOIR AU TRAVERS ET Y VOIR UN REFLET. EN MÊME TEMPS !
DONC UNE PARTIE DE LA LUMIÈRE REPART, MAIS SEULEMENT UNE PARTIE, PAS TOUTE !
PAR EXEMPLE, SI DE LA LUMIÈRE TRAVERSE TOUT DROIT UNE PLAQUE DE VERRE À DEUX FACES (UNE DEVANT ET UNE DERRIÈRE), ENVIRON 8 % EST RÉFLÉCHI. SOIT ENVIRON 4 % PAR SURFACE.

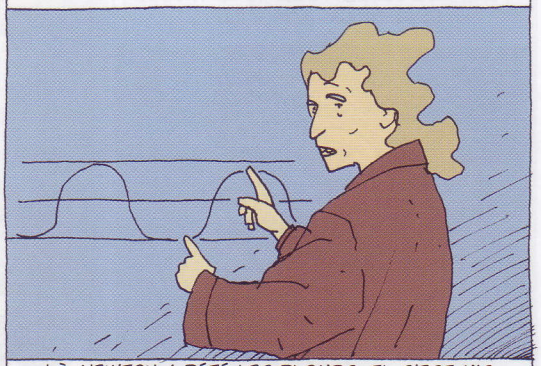

COMMENT LA LUMIÈRE PEUT-ELLE SE RÉFLÉCHIR PARTIELLEMENT? POUR CHAQUE COULEUR DE LUMIÈRE, CHAQUE PARTICULE A EXACTEMENT LA **MÊME** FORCE, EXACTEMENT LA **MÊME** ÉNERGIE, IL N'Y A PAS DE DEMI-PARTICULES.
ALORS ON REGARDE LA LUMIÈRE ET ON DOIT SE DEMANDER : "COMMENT UN PHOTON DONNÉ DÉCIDE D'ÊTRE RÉFLÉCHI OU DE TRAVERSER LA SURFACE?"
HA HA HA
HÉ, ON NE PEUT PAS SE CONTENTER DE RIRE! IL NOUS FAUT UNE THÉORIE.
ON EN A PROPOSÉ PLEIN. MAIS EN FAIT : ON NE PEUT PAS PRÉVOIR CE QU'UN PHOTON PRÉCIS VA FAIRE. LA NATURE NE NOUS PERMET QUE DE CALCULER DES PROBABILITÉS.
MAIS COMMENT...
JE NE COMPRENDS PAS.
JE N'AIME PAS ÇA.
JE SENS QUE VOUS ÊTES PERDUS, LÀ.
JE VOUS VOIS DIRE "JE NE COMPRENDS PAS", JE VOUS VOIS PENSER "JE N'AIME PAS ÇA".
DUR, HEIN?
MOI NON PLUS JE NE COMPRENDS PAS. ET JE N'AIME PAS ÇA.
MAIS C'EST COMME ÇA.
REVENONS À L'EAU. SI VOUS AVEZ UNE BULLE DE SAVON À LA PLACE DU LAC AU CLAIR DE LUNE, IL Y A DEUX SURFACES : L'INTÉRIEUR ET L'EXTÉRIEUR DE LA BULLE. ET QUAND LA LUMIÈRE DU SOLEIL LA TOUCHE, VOUS VOYEZ DES COULEURS!
SI C'EST DE LA LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE ROUGE QUI LA TOUCHE, VOUS VOYEZ DES BANDES ROUGES ET NOIRES.
CERTAINES ZONES REFLÈTENT LA LUMIÈRE ROUGE, D'AUTRES NE REFLÈTENT RIEN. ÇA DÉPEND DE **L'ÉPAISSEUR** : NEWTON L'A COMPRIS ET IL A FAIT DES EXPÉRIENCES AVEC DU VERRE.
POP
SI VOUS CHANGEZ L'ÉPAISSEUR VOUS OBTENEZ DES POURCENTAGES DIFFÉRENTS DE PROBABILITÉ DE RÉFLEXION.

AVEC UNE ÉPAISSEUR NULLE, PAS DE RÉFLEXION. LOGIQUE. MAIS APRÈS...



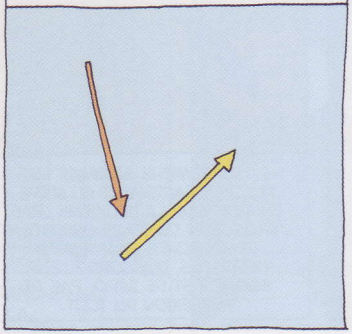
L'HORREUR.

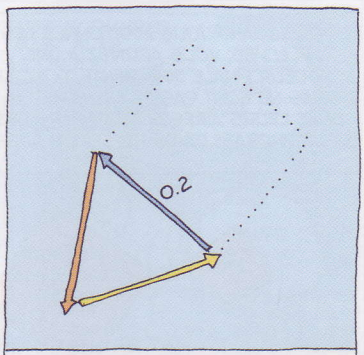
SI VOUS AJOUTEZ UNE DEUXIÈME SURFACE, LA RÉFLEXION DEVIENT NULLE À CERTAINS ENDROITS, ET APRÈS ELLE PASSE AU MAXIMUM!



LÀ, NEWTON A PÉTÉ LES PLOMBS. IL S'EST MIS À PARLER "D'ACCÈS PRIVILÉGIÉS" DE RÉFLEXION ET DE TRANSMISSION.

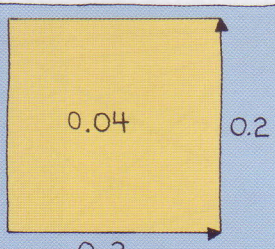
SUR UNE FEUILLE DE PAPIER, VOUS DESSINEZ UNE FLÈCHE POUR CHAQUE RÉFLEXION. UNE POUR LA RÉFLEXION SUR LA SURFACE FRONTALE, UNE POUR LA RÉFLEXION SUR LA SURFACE ARRIÈRE.





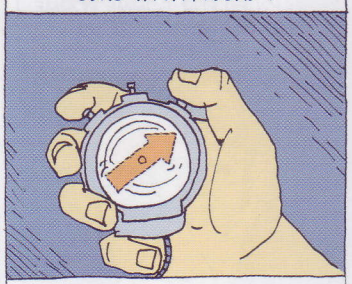
ET VOUS AJOUTEZ LES FLÈCHES, L'UNE À LA SUITE DE L'AUTRE. VOUS LES RELIEZ, ÇA DONNE UNE TROISIÈME FLÈCHE. VOUS MESUREZ LE CARRÉ QU'ELLE FORME.

SI L'AIRE DU CARRÉ EST GRANDE, VOUS AVEZ UNE GRANDE PROBABILITÉ DE RÉFLEXION. SI ELLE EST PETITE, ELLE EST FAIBLE.

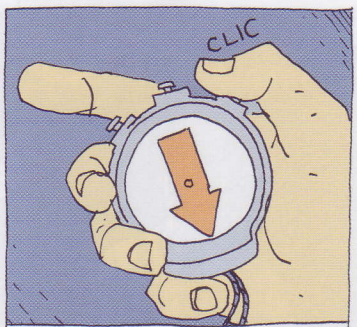


POUR 4 % DE CHANCES DE RÉFLEXION POUR CHAQUE SURFACE, LA TAILLE DE LA FLÈCHE EST DE 0,2 X 0,2 = 0,04.

COMMENT SAVOIR DANS QUEL SENS VA LA FLÈCHE ?

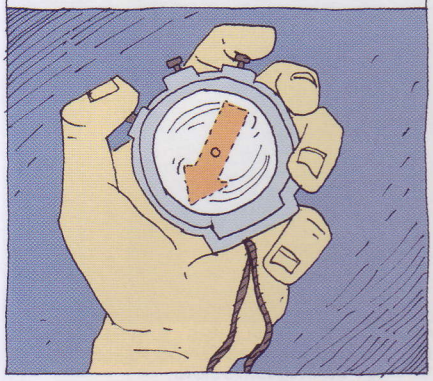


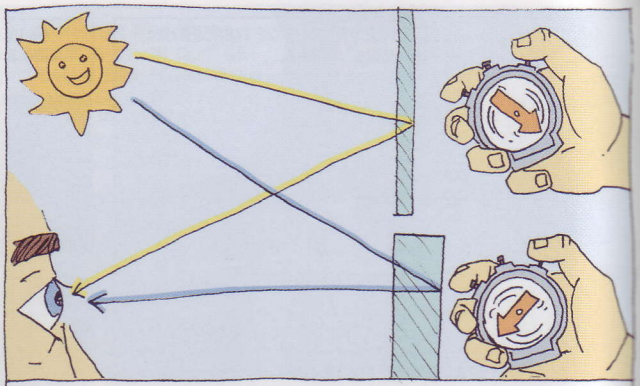
COMMENCEZ PAR L'ORIENTER DANS UN SENS, N'IMPORTE LEQUEL. QUAND ELLE QUITTE LA SOURCE DE LA LUMIÈRE FAITES-LA TOURNER COMME L'AIGUILLE D'UN CHRONOMÈTRE.



LA FLÈCHE VA TOURNER TRÈS VITE : LA LUMIÈRE VA TRÈS VITE. QUAND ELLE TOUCHE UN DÉTECTEUR DE LUMIÈRE (VOTRE ŒIL PAR EXEMPLE) APRÈS S'ÊTRE RÉFLÉCHIE, ARRÊTEZ LE CHRONO ET REGARDEZ LA DIRECTION DE LA FLÈCHE.

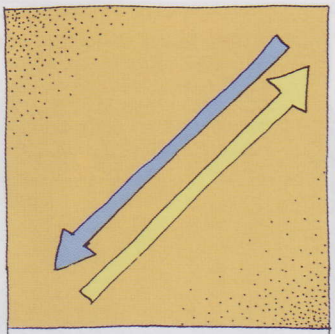
ÇA, C'EST LA PREMIÈRE SURFACE. POUR L'ARRIÈRE DU VERRE, FAITES DÉMARRER LA FLÈCHE DU CÔTÉ OPPOSÉ. MÊME VITESSE DE ROTATION, MAIS À 180°.





DONC SI LE VERRE CHANGE D'ÉPAISSEUR, LA DEUXIÈME FLÈCHE, QUI REVIENT DE LA SURFACE DU FOND, VA ARRIVER À UN AUTRE ENDROIT AU MOMENT OÙ LE PHOTON ATTEINT VOTRE ŒIL. **PARCE QU'IL VOYAGE PLUS LOIN ET DONC MET PLUS DE TEMPS À ARRIVER.**

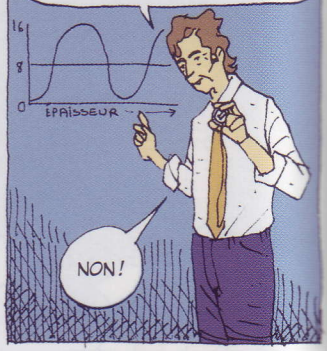
DONC QUAND VOUS ADDITIONNEZ LES FLÈCHES, VOUS ARRIVEZ À UNE LONGUEUR FINALE DIFFÉRENTE, DONC LES CARRÉS NE SONT PAS DE LA MÊME TAILLE, DONC LEURS AIRES SONT DIFFÉRENTES ET LA PROBABILITÉ DE RÉFLEXION AUSSI.



SI LA PREMIÈRE SURFACE EST PLACÉE EXACTEMENT AU MÊME ENDROIT QUE LA DEUXIÈME (PAS D'ÉPAISSEUR DU TOUT) ON OBTIENT DES FLÈCHES EXACTEMENT OPPOSÉES, D'ACCORD? LEUR SOMME EST DE ZÉRO. PAS DE RÉFLEXION DU TOUT.

EXACTEMENT!

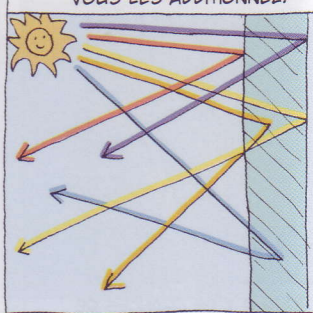
MAINTENANT VAIS-JE VOUS EXPLIQUER LE PETIT JEU QUI PERMET DE PRÉVOIR CES COURBES QUI MONTENT ET QUI DESCENDENT?



C'EST EXACTEMENT CE QUE JE NE VAIS **PAS** VOUS EXPLIQUER. PARCE QUE **JE NE LE COMPRENDS PAS.**

UN : ON APPELLE LES FLÈCHES DES AMPLITUDES, ET LA TAILLE DU CARRÉ QUE LEUR SOMME FORME, C'EST LA PROBABILITÉ D'UN ÉVÉNEMENT.

POUR TROUVER LA PROBABILITÉ D'UN ÉVÉNEMENT, VOUS PLACEZ VOS FLÈCHES L'UNE APRÈS L'AUTRE, DE TOUTES LES FAÇONS POSSIBLES ET VOUS LES ADDITIONNEZ.



LE RÉSULTAT NOUS DONNE LA PROBABILITÉ TOTALE.

TROIS : ÇA NE MARCHE PAS QU'AVEC LA LUMIÈRE ! ÇA MARCHE AUSSI AVEC LES ÉLECTRONS, ET AVEC L'INTERACTION DES ÉLECTRONS AVEC DES PHOTONS OU D'AUTRES ÉLECTRONS.

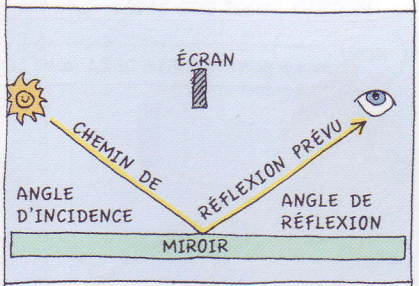
VOILÀ LA QED.

ÇA EXPLIQUE QUE LA LUMIÈRE SE PROPAGE EN LIGNE DROITE, QU'ELLE SOIT FOCALISÉE PAR UNE LENTILLE, QU'ELLE SE RÉFLÉCHISSE À ANGLES ÉGAUX, LES MIRAGES...

TOUT. **TOUT EST LÀ.**

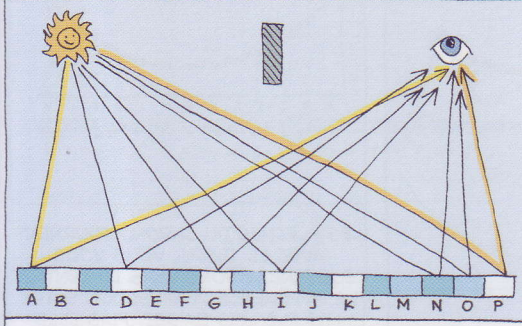
LE VRAI DÉFI, C'EST DE ME RETENIR DE VOUS MONTRER TOUS LES EXEMPLES !

MAIS IL FAUT QUE JE VOUS EN MONTRE AU MOINS UN. PRENONS UN MIROIR.



VOUS SAVEZ, OU VOUS CROYEZ SAVOIR, QUE QUAND ON DÉTECTE LA LUMIÈRE, PARTIE D'UN POINT PUIS RÉFLÉCHIE SUR UN MIROIR, ELLE PREND CE TYPE DE CHEMIN.

MAIS IMAGINEZ QUE LA SURFACE EST DIVISÉE EN PETITES TRANCHES. UN PHOTON A ALORS PLUSIEURS MOYENS D'ALLER DE LA SOURCE À VOTRE ŒIL.



IL PEUT ALLER VERS CETTE TRANCHE-LÀ, PUIS REBONDIR COMME ÇA.

JE VOUS ENTENDS MURMURER ENCORE, MAIS JE NE SUIS PAS CINGLÉ.

ÇA SE PASSE VRAIMENT COMME ÇA.

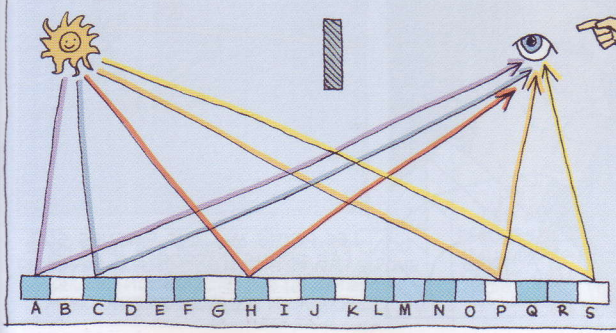
VOUS ÊTES CINGLÉ !

C'EST PAS LES MÊMES ANGLES.

J'AIME PAS ÇA.

IL PEUT AUSSI PASSER PAR LÀ OU LÀ OU LÀ ET REPARTIR... OU IL POURRAIT ALLER OÙ VOUS VOULEZ, ET REPARTIR OÙ VOUS VOULEZ.

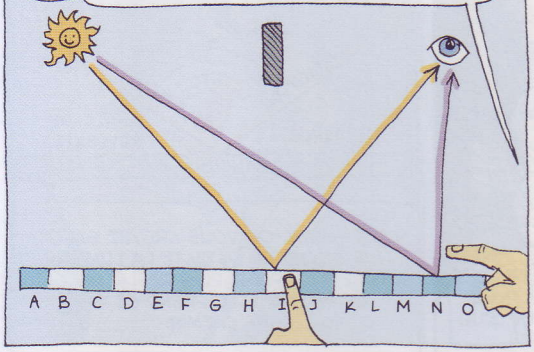
ET IL PEUT ALLER LÀ ET REPARTIR, ENCORE ET ENCORE, PAR **TOUTES** LES POSSIBILITÉS.



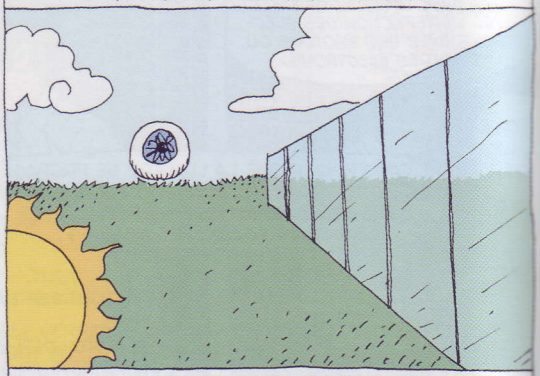
L'IDÉE, C'EST QU'IL Y A DES FLÈCHES (DES AMPLITUDES) POUR CHACUN DE CES CHEMINS, ET QU'ON LES PREND **TOUTES** POUR TROUVER LA PROBABILITÉ **TOTALE** QUE LE PHOTON ARRIVE LÀ.

NATURELLEMENT, LA FLÈCHE (L'AMPLITUDE) EST PLUS LONGUE ICI QUE LÀ...

NON ! ELLES SONT PRESQUE DE LA MÊME LONGUEUR.

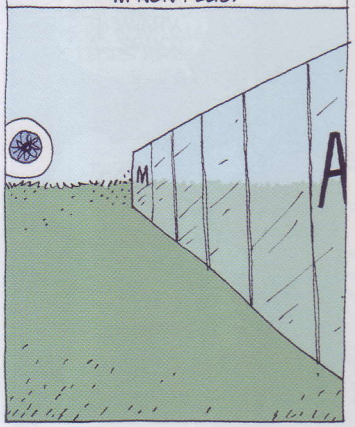


C'EST LE **TEMPS** QUI CHANGE. IMAGINEZ QUE VOUS DEVEZ PARTIR DE LA SOURCE DE LUMIÈRE ET ALLER À L'ŒIL LE PLUS VITE POSSIBLE.

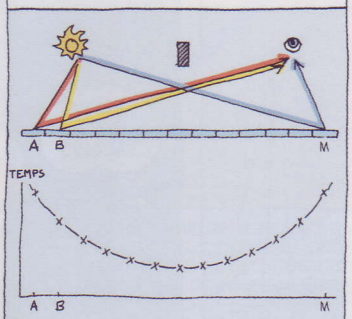


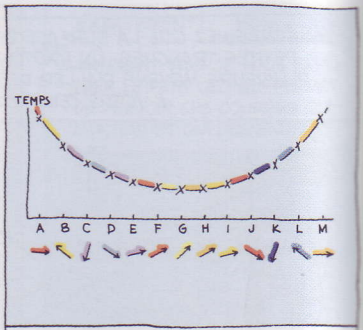
... EN COURANT. ET VOUS DEVEZ TOUCHER LE MIROIR EN ROUTE.

TOUCHER AU POINT A N'EST PAS LA MEILLEURE IDÉE. AU POINT M NON PLUS.



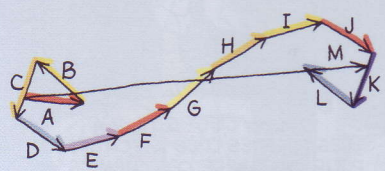
LE TEMPS QUE ÇA PREND, SI ON LE REPORTE EN DESSOUS, RESSEMBLE À ÇA. LE POINT A PREND BEAUCOUP PLUS DE TEMPS QUE LE POINT B.





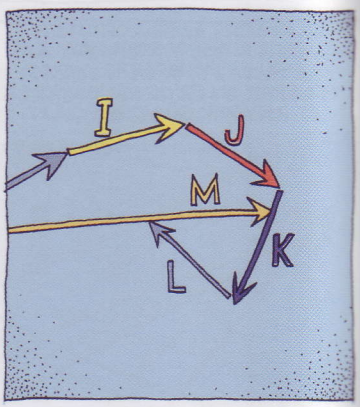
LES FLÈCHES DU CHRONO TOURNENT AVEC LE TEMPS, VOUS VOUS SOUVENEZ ? DONC VERS LE CENTRE LA DIFFÉRENCE DE DIRECTION ENTRE LES FLÈCHES BAISSE, PUIS ELLE RÉAUGMENTE AU FUR ET À MESURE.

MAIS SI ON LES ADDITIONNE TOUTES, ON N'EN A PAS DEUX COMME TOUT À L'HEURE, ON EN A DES **MILLIONS**. ET ON TROUVE UN RÉSULTAT NET (UNE AMPLITUDE TOTALE) POUR L'ARRIVÉE DU PHOTON. C'EST CETTE LIGNE VERTIGINEUSE. ET SA LONGUEUR DÉPEND SURTOUT DES FLÈCHES D À J.

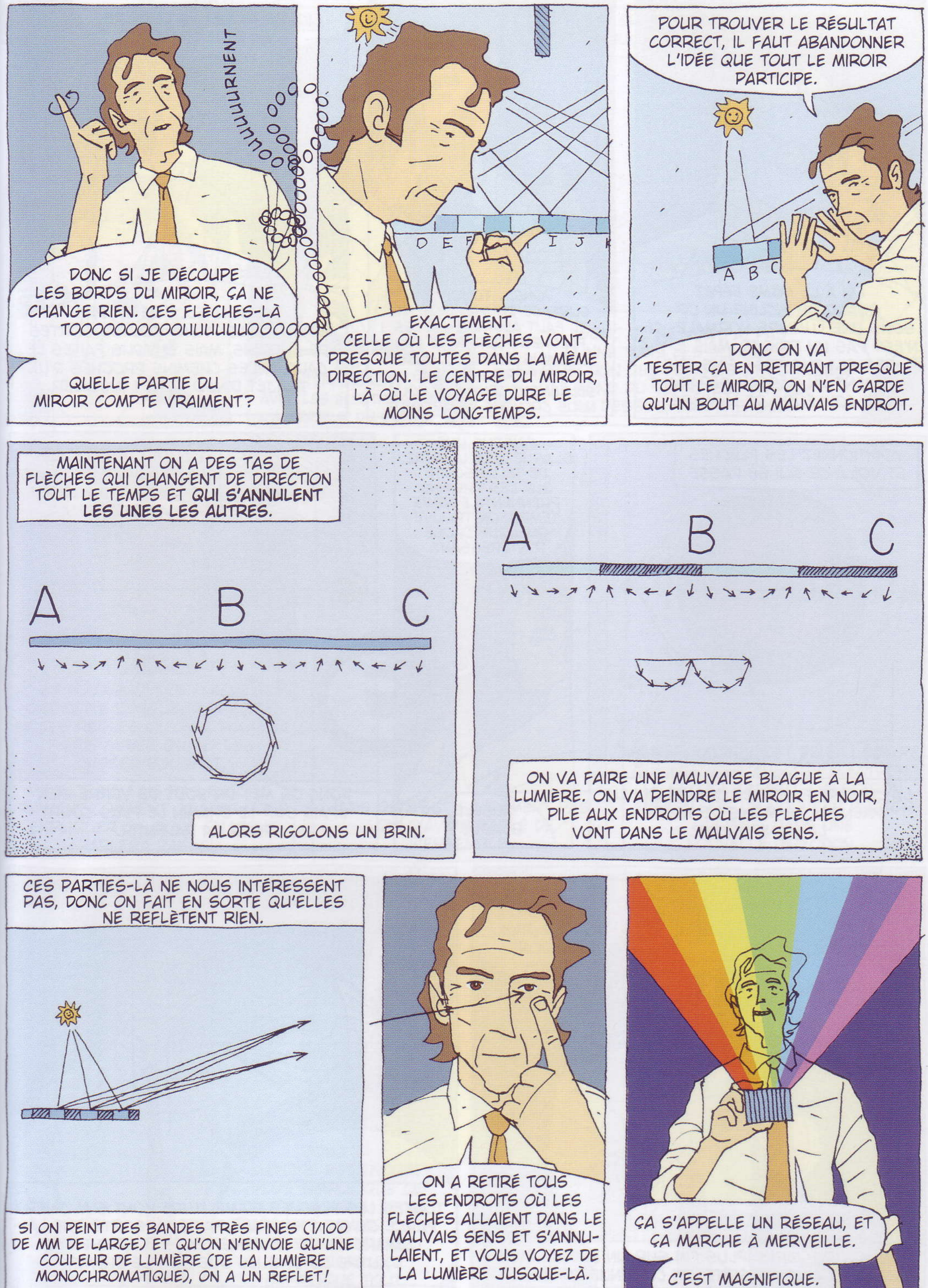


DONC, LA QED PRÉVOIT QUE LA LUMIÈRE SE RÉFLÉCHIT DANS LE MIROIR.

TRÈS BIEN !



LES PETITS MACHINS DINGUES SUR LES BORDS N'APPORTENT QUASIMENT RIEN. ILS TOURNENT EN ROND ET ILS S'ANNULENT.


TOUUUUUUURNENT
DONC SI JE DÉCOUPE LES BORDS DU MIROIR, ÇA NE CHANGE RIEN. CES FLÈCHES-LÀ TOOOOOOOOOOUUUUUUOOOOOOO
QUELLE PARTIE DU MIROIR COMPTE VRAIMENT?
D E F I J K
EXACTEMENT. CELLE OÙ LES FLÈCHES VONT PRESQUE TOUTES DANS LA MÊME DIRECTION. LE CENTRE DU MIROIR, LÀ OÙ LE VOYAGE DURE LE MOINS LONGTEMPS.
POUR TROUVER LE RÉSULTAT CORRECT, IL FAUT ABANDONNER L'IDÉE QUE TOUT LE MIROIR PARTICIPE.
A B C
DONC ON VA TESTER ÇA EN RETIRANT PRESQUE TOUT LE MIROIR, ON N'EN GARDE QU'UN BOUT AU MAUVAIS ENDROIT.
MAINTENANT ON A DES TAS DE FLÈCHES QUI CHANGENT DE DIRECTION TOUT LE TEMPS ET QUI S'ANNULENT LES UNES LES AUTRES.
A B C
ALORS RIGOLONS UN BRIN.
A B C
ON VA FAIRE UNE MAUVAISE BLAGUE À LA LUMIÈRE. ON VA PEINDRE LE MIROIR EN NOIR, PILE AUX ENDROITS OÙ LES FLÈCHES VONT DANS LE MAUVAIS SENS.
CES PARTIES-LÀ NE NOUS INTÉRESSENT PAS, DONC ON FAIT EN SORTE QU'ELLES NE REFLÈTENT RIEN.
SI ON PEINT DES BANDES TRÈS FINES (1/100 DE MM DE LARGE) ET QU'ON N'ENVOIE QU'UNE COULEUR DE LUMIÈRE (DE LA LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE), ON A UN REFLET!
ON A RETIRÉ TOUS LES ENDROITS OÙ LES FLÈCHES ALLAIENT DANS LE MAUVAIS SENS ET S'ANNULAIENT, ET VOUS VOYEZ DE LA LUMIÈRE JUSQUE-LÀ.
ÇA S'APPELLE UN RÉSEAU, ET ÇA MARCHE À MERVEILLE.
C'EST MAGNIFIQUE.

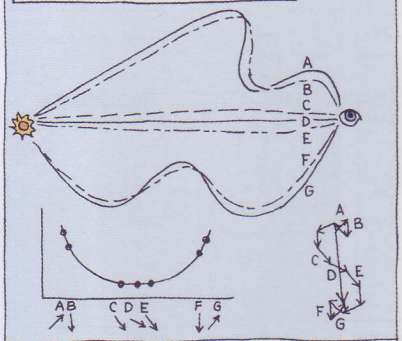
ON A LE MÊME EFFET QUAND ON INCLINE UN CD SOUS UNE LUMIÈRE NORMALE. CE N'EST PAS UN PRISME, MAIS IL Y A DES SILLONS TRÈS FINS, QUI FORMENT UN RÉSEAU SÉPARANT LES COULEURS DE LUMIÈRE.

DONC... TOUTE LA SURFACE DU MIROIR SERT. IL FAUT ADDITIONNER LES FLÈCHES POUR TOUS LES CHEMINS QUE LA LUMIÈRE PEUT PRENDRE : PAS SEULEMENT CEUX QUE NOUS, NOUS CROYONS IMPORTANTS.

ET POURQUOI LA LUMIÈRE VA TOUT DROIT?

EH BIEN, ELLE NE VA PAS DROIT! ELLE PREND TOUTES SORTES DE CHEMINS, MAIS SI VOUS FAITES LE CALCUL, LES CHEMINS **PROCHES** D'UN TRAJET DINGO VONT **L'ANNULER**.

ADDITIONNEZ LES FLÈCHES ET VOILÀ CE QUI SE PASSE.



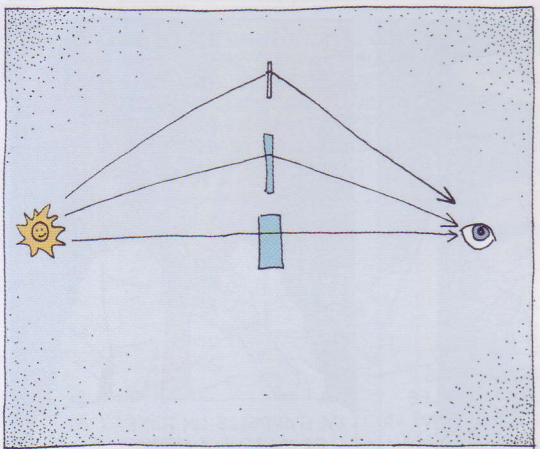
LA LUMIÈRE FLAIRE LE CHEMIN QUI LUI PRENDRA LE MOINS DE TEMPS : LA LIGNE DROITE.

FAISONS UNE BLAGUE À LA LUMIÈRE, DE TELLE SORTE QUE LES CHEMINS PRENNENT LE MÊME TEMPS. ON TROUVE QUELQUE CHOSE D'INTÉRESSANT.

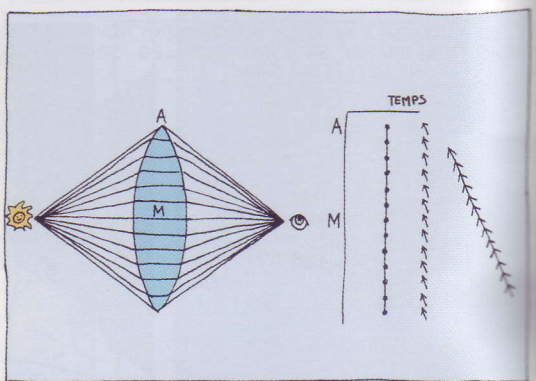
QUELLE BLAGUE?

EN VOILÀ UNE : ON SAIT QUE LA LUMIÈRE MET PLUS DE TEMPS À TRAVERSER LE VERRE QUE L'AIR.

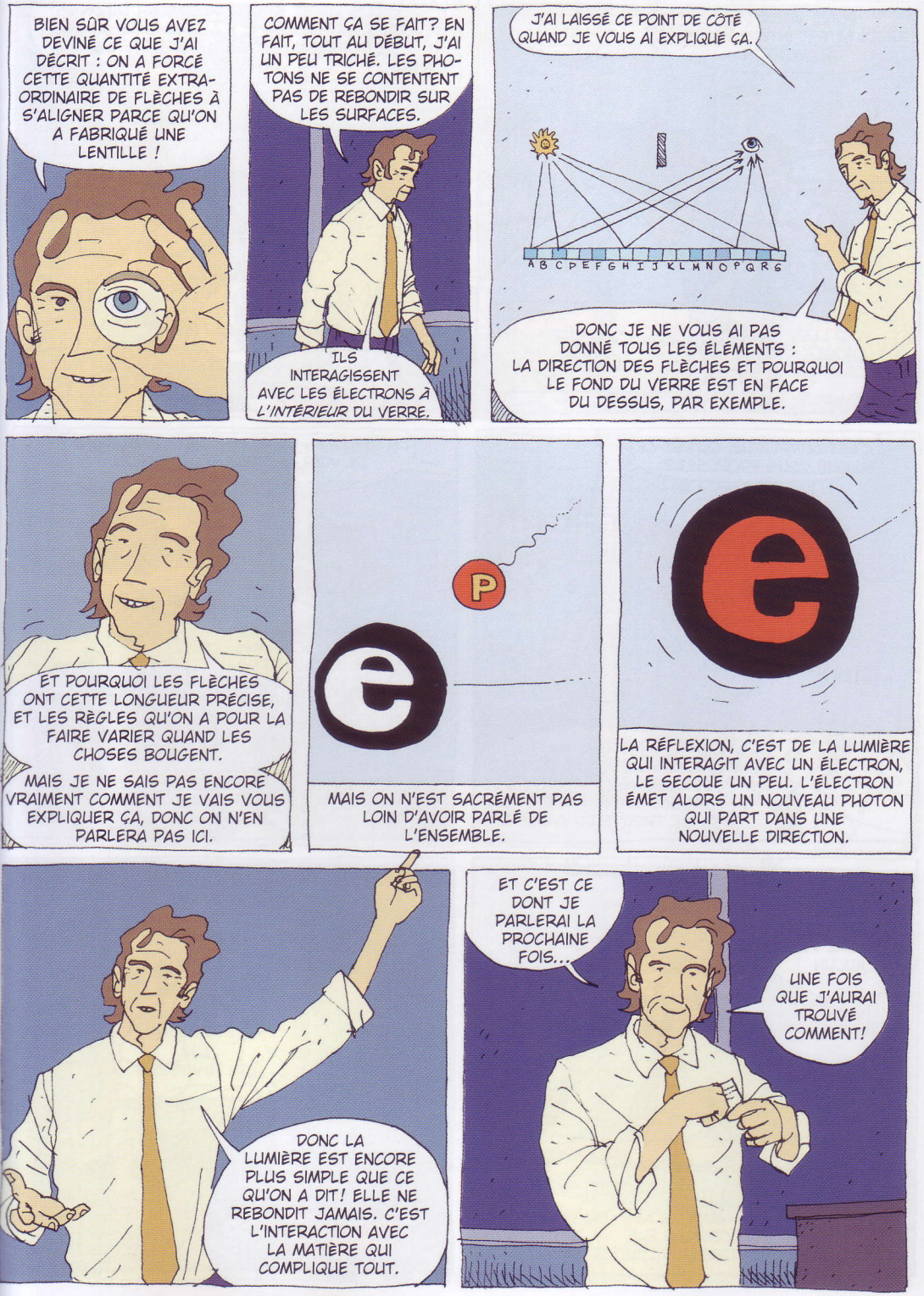
DONC ON MET UN BOUT DE VERRE BIEN ÉPAIS SUR LE CHEMIN LE PLUS COURT POUR LA RALENTIR.



ON MET DU VERRE PLUS FIN SUR UN CHEMIN PLUS LONG, ET AINSI DE SUITE, ON CONTINUE COMME ÇA.



TOUTES LES FLÈCHES D'AMPLITUDE VONT S'ALIGNER, PARCE QU'ON A RÉUSSI À FAIRE EN SORTE QUE LA LUMIÈRE METTE LE MÊME TEMPS À ARRIVER DE L'AUTRE CÔTÉ, QUEL QUE SOIT LE CHEMIN.


BIEN SÛR VOUS AVEZ DEVINÉ CE QUE J'AI DÉCRIT : ON A FORCÉ CETTE QUANTITÉ EXTRAORDINAIRE DE FLÈCHES À S'ALIGNER PARCE QU'ON A FABRIQUÉ UNE LENTILLE !
COMMENT ÇA SE FAIT ? EN FAIT, TOUT AU DÉBUT, J'AI UN PEU TRICHÉ. LES PHOTONS NE SE CONTENTENT PAS DE REBONDIR SUR LES SURFACES.
ILS INTERAGISSENT AVEC LES ÉLECTRONS À L'INTÉRIEUR DU VERRE.
J'AI LAISSÉ CE POINT DE CÔTÉ QUAND JE VOUS AI EXPLIQUÉ ÇA.
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S
DONC JE NE VOUS AI PAS DONNÉ TOUS LES ÉLÉMENTS : LA DIRECTION DES FLÈCHES ET POURQUOI LE FOND DU VERRE EST EN FACE DU DESSUS, PAR EXEMPLE.
ET POURQUOI LES FLÈCHES ONT CETTE LONGUEUR PRÉCISE, ET LES RÈGLES QU'ON A POUR LA FAIRE VARIER QUAND LES CHOSES BOUGENT.
MAIS JE NE SAIS PAS ENCORE VRAIMENT COMMENT JE VAIS VOUS EXPLIQUER ÇA, DONC ON N'EN PARLERA PAS ICI.
P
MAIS ON N'EST SACRÉMENT PAS LOIN D'AVOIR PARLÉ DE L'ENSEMBLE.
LA RÉFLEXION, C'EST DE LA LUMIÈRE QUI INTERAGIT AVEC UN ÉLECTRON, LE SECOUE UN PEU. L'ÉLECTRON ÉMET ALORS UN NOUVEAU PHOTON QUI PART DANS UNE NOUVELLE DIRECTION.
DONC LA LUMIÈRE EST ENCORE PLUS SIMPLE QUE CE QU'ON A DIT ! ELLE NE REBONDIT JAMAIS. C'EST L'INTERACTION AVEC LA MATIÈRE QUI COMPLIQUE TOUT.
ET C'EST CE DONT JE PARLERAI LA PROCHAINE FOIS...
UNE FOIS QUE J'AURAI TROUVÉ COMMENT !