مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية ـ المجلد ١٢ (العددان ٣و٤) ١٤١١هـ ـ ١٩٩٠م

دراسات حول تدفق الماء والطاقة ضمن المنظومة البيئية وأسس نمذجته

١١ـ استخدام الموديلات الرياضية في مجال علم البيئة

الدكتور أحمد الخضر
أستاذ مساعد في كلية الزراعة
جامعة تشرين

حاولنا في هذه المقالة أن نشرح مفهوم وبناء الموديلات ،ومن ثم استخدامات هذه الموديلات خصوصا في مجال البيئة النباتية ،هادفين من وراء ذلك الى أن نوضح للعاملين في مجال علم البيئة بأنه لان كان وضع الموديل يتطلب الكثير من المعارف البيئية فانه لايتطلب بشكل عام في مجال الرياضيات الا معرفة لبعض المفاهيم الأساسية كحساب التفاضل والمصفوفات .

١ ـ مقدمة :

يميل علم البيئة يوما عن آخر،وكبقية العلوم الأخرى ،للانتقال من وصف الظواهر الى ضبطها وتحديد علاقاتها مع الظواهر الأخرى وذلك بمساعدة نظرية المعلومات (Théorie d'information) وتقنيات التحليل متعدد الأبعاد (Analyse mutidimensionnelle)والاحصاء الرياضي.

لقد نتج عن هذا الانتقال انبثاق فرع خاص من علم البيئة يمكن تسميته بعلم البيئة الرياضي(Ecologie mathématique) الذي أخذ يفرض نفسه بسرعة مع شيوع استعمال الحاسبات الآلية الضخمة . استقبلت الموديلات الرياضية في البداية بالكثير من التحفظ واقتصرقبولها على مجموعة صغيرة من البيئيين (Odum , 1957) وذلك بسبب الهفوات والأخطاء التي ارتكبها واضعو هذه الموديلات أو لكونها غير منسجمة مع الواقع ؛ أو نتيجة لعدم عرضها بشكل متسل وواضح . في الواقع ، ان ماحدث في البدا هو أن واضعي هذه الموديلات كانوا من العاملين في مجال الاحصاء الرياضي الذ لم تكن لديهم المعرفة الكافية بعلم الاجتماع النباتي(Phytosociologie)و النظرية الأخرى في مجال علم البي عكس ماهو متطلب في هذا الميدا لأن وضع موديل في مجال علم ال لايتطلب عموما في مجال الريا المفاهيم الأساسية ،في حين الى معرفة معمقة بعلم الب لايعني على الاطلاق انقاه

المنوط بالعاملين في مجال الرياضيات والبرمجة، والذي يتجلى بوضع الموديل موضع العمل وحسن استثماره . ينتج عن ذلك بأن أفضل النتائج انما يستحصل عليها في هذا المجال بالتعاون المثمر بين العاملين في مجالات علم البيئة والرياضيات والبرمجة بالاضافة للمراقبين المختصين برصد الظواهر الطبيعية. تؤدي الموديلات الرياضية دورا بارزا وهاما في الضبط والتأطير الكمي للمعطيات الوصفية لعلم البيئة ،حيث يمكن ايضاح ذلك بمثال بسيط لمسألة متعلقة بعلم البيئة العام (Ecologie générale) نستدرك من خلاله فوائد استخدام الموديلات الرياضية في هذا المجال : لنفرض مثلا بأن العلاقة بين عدد أنواع الاسماك (N) وبين المساحة (S) مقاسة بالكيلومترات المربعة والموزعة على اثني عشر حوضا مائيا في منطقة بيئة معينة معطاة بالمعادلة :

$$LogN=0,19LogS + 0,253$$

نسمي معادلة مستقيم التراجع الخطي للوغاريتم N في لوغاريتم S بموديل رياضي (Modèl mathématique) يمكن تبسيطه بكتابته بالشكل $N=1,791\ S^{0,19}$ أو بصفة عامة على النحو التالي $N=aS^b$ حيث a و b هما على التوالي ترتيب نقطة الاصل وميل مستقيم التراجع الخطي. من خلال هذا المثال البسيط يمكن حصر أهم مزايا استخدام الموديلات الرياضية في مجال علم البيئة بأربع مزايا رئيسية :

ـ التبسيط والاقتصاد في وصف الظواهر، حيث رأينا في المثال السابق امكانية وصف الغنى النوعي (richesse spécifique) للأحواض المائية بالاسماك باستخدام موديل رياضي بسيط ($N = aS^b$)، لكن مما تجدر الاشارة اليه هنا أن تبسيط موديل رياضي مستخدم لوصف ظاهرة ما قد يسبب في كثير من الاحيان خسارة لبعض المعلومات المتعلقة بالظاهرة وبالتالي في دقة تحديدها .

ـ امكانية استخدام الموديل أو الانموذج لاستنباط بعض القيم المنضوية ضمن حدوده ،وتعميمه لايجاد بعض القيم الواقعة خارج هذه الحدود . في الواقع ،يكون الموديل الرياضي من حيث المبدأ قابلا للاستعمال من أجل جميع القيم (المتحولات) المعرف من أجلها ،ولكن لايكون له مدلول بشكل عام الا في مجال ملاحية محددة بدقة ،بحيث لايبقى لاستعمال الموديل خارج مجال ملاحيته أي معنى . فاذا فرضنا في المثال السابق أن الموديل $N = aS^b$ قد وضع انطلاقا من عدد أنواع الاسماك (N) في الاحواض المائية الاثني عشر والتي مساحاتها (S) : ١٠، ٢٠، ٣٠، ٤٠، ٥٠، ٦٠، ٧٠، ٨٠، ٩٠، ١٠٠، ٥٠٠، ١٠٠٠ كم٢ ،في هذه الحالة يمكن القول بأن الموديل معرّف من أجل جميع قيم S المحصورة بين ١٠ ـ ١٠٠٠ كم٢ ،وبالتالي يمكن استنتاج قيمة N من أجل S = 200 بدقة جيدة رغم عدم الاعتماد على هذا الرقم عند تكوين الموديل ،حيث يسمى هذا الاستنتاج تضمينا ،بالمقابل فاننا نستطيع استنتاج قيمة N من أجل S=5 أو S = 3000 مثلا عن طريق التعميم ،ولكن بالطبع بدقة أقل من الاستنتاج السابق. أخيرا فلو فرضنا بأن الموديل السابق وضع للتعبير عن الغنى النوعي بالأسماك للأحواض المائية المغربية فانه بالامكان أقلمة موديلات أخرى مشابهة لتعبر عن غنى الاحواض المائية السورية أو الجزائرية بالأسماك بعد تحديد قيم جديدة لكل من a و b . أي أن موديلا رياضيا قد يسمح بنفس الوقت بتحديد سلوك الظواهر

المراقبة وبالتنبؤ عن الشكل العام لسلوك بعض الظواهر الاخرى التي لم تجر مراقبتها .

- امكانية استخدام الموديل لادخال بعض المفاهيم الجديدة : في الواقع ، قد لاتكون الحدود التي ينضوي عليها موديل رياضي محدد تحديدا بيولوجيا بسيطا وواضحا ، وذلك لأنها غالبا ماتعتمد على مفاهيم مجردة ، لكن مع ذلك فان ادخالها في دراسة الظواهر البيولوجية قد يكون غاية في الأهمية فمثلا لو أرجعنا الموديل $N = aS^b$ الى الشكل اللوغاريتمي :

$LogN = b\ Log\ S + Log\ a$ فاننا نستطيع ترجمته بسهولة من حيث أن لوغاريتم الغنى النوعي بالاسماك يزداد بمقدار "b" عندما يزداد لوغاريتم الحوض المائي بمقدار وحدة واحدة (أي عند ازدياد مساحة الحوض عشر مرات) ، وبالتالي فان " b " تقيس بشكل من الاشكال سرعة تزايد N بالتبعية لـ S . أما Log a الذي يربط بين N و S فان a تمثل هنا الغنى النوعي بالاسماك لواحدة المساحة (١كم٢) من الاحواض المائية . من جهة أخرى فاننا لو أجرينا مقارنة للغنى النوعي بالأسماك لأحواض مائية واقعة في مناطق جغرافية حيوية (Biogéographie) مختلفة وفقا للموديل السابق لوجدنا أن ذلك مستحيلا باستثناء الحالة الخاصة التي تكون فيها هذه الاحواض متساوية المساحة . لكننا اذا عرفنا الموديل الخاص بكل منطقة فاننا نستطيع وبسهولة اجراء المقارنة باستخدام قيم b لمعرفة سرعة تزايد الغنى النوعي بتزايد المساحة وباستخدام قيم a لمقارنة الغنى النسبي (richesse relative) بالأسماك في الأحواض المائية مدخلين بذلك مفهوما جديدا يسمح بمقارنة الاحواض المائية المختلفة بغض النظر عن مساحتها .

- امكانية استخدام الموديل لوصف ظواهر أخرى علاوة عن الظاهرة التي صمم من أجل تحديدها ، فعلى سبيل المثال لاينحصر استخدام الموديل السابق ($N=aS^b$) على دراسة توزع الانواع السمكية ضمن الاحواض المائية بل يمكن استخدامه أيضا لدراسة توزع أنواع أخرى من الاحياء كالأحياء الارضية التي تشغل مساحة محددة ، فلقد أشار الباحثون في هذا المجال (Preston,1962) ، بأن موديلا كالذي مر ذكره قد يكون صالحا لدراسة جميع ظواهر المنظومة البيئية (Ecosystème) المحققة لمجموعة من المواصفات والتي تعتبر الثلاث التالية منها أساسية :

- أن تكون المنظومة مؤلفة من كيانات منعزلة بحيث لاتكون الاحياء عند تخوم هذه الكيانات ذات تأثير على بعضها البعض ،

- أن تكون كثافة تجمعات الاحياء التي تقطن المنظومة البيئية قابلة للمقارنة مع بعضها كزمرة أو كمجموعة من الزمر ،

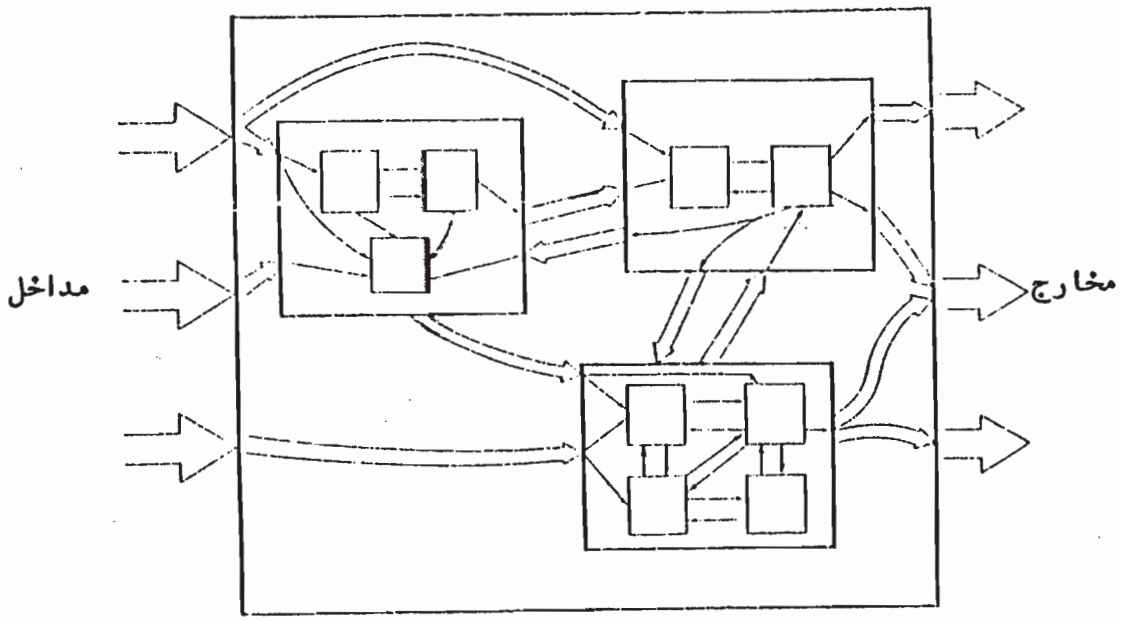
- أن تكون الأحياء قد وصلت الى حالة توازن من حيث توزع الانواع وانتشارها ضمن الحيز الموجود .

ان امكانية تعميم موديل رياضي تابعة من حيث المبدأ للبساطة والدقة المتوخاة ، فالموديلات المعقدة تكون عموما أقل قابلية للتعميم من تلك البسيطة . وبالتالي فهناك خيار للعاملين بعلم البيئة بين الاعتماد على موديلات بسيطة سهلة التحديد وقابلة للاستخدام بشكل تقريبي في العديد من الحالات أو البحث عن موديلات متقدمة أكثر تعقيدا وأكثر دقة ولكنها قد لاتصلح الا لدراسة الظاهرة المعدة من أجلها بالذات .

٢- تشكيل الموديلات (Modelisation) وتحليل المنظومات (Analyse des Systèmes) :

بما أن طرق تشكيل الموديلات واستخدامها معروفة في مجالات أخرى غير مجال علم البيئة، فانه من المنطقي أن نقوم بتلخيص وأقلمة المفاهيم العامة لتشكيل الموديلات وتحليل المنظومات وذلك قبل التطرق للتطبيقات البيئية لهذه المفاهيم.

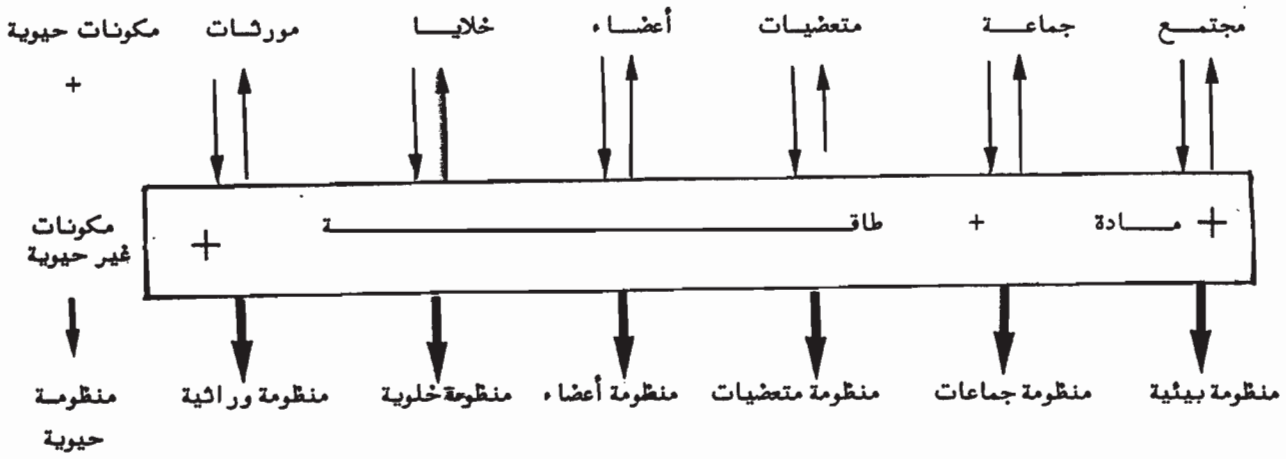
في الواقع، نطلق اسم منظومة في مجال الفيزياء على مجموعة من المكونات المرتبطة بطريقة تشكل معها كلا لايتجزأ أو تؤثر ككل لايتجزأ ويمكن أن نذكر كأمثلة على ذلك الدارات الكهربائية والالكترونية التي اوجدت في البداية وكانت وراء تطور مفهوم المنظومات . ان أهم مزايا هذا المفهوم هو تركيزه على خواص الدارة ككل وليس على المكونات الجزئية لهذه الدارة . انطلاقا من ذلك فاننا نستطيع تعريف المنظومة في مجال العلوم الحيوية بأنها عبارة عن مجموعة من المكونات التي لايمكن الالمام بها كليا ، اضافة الى ذلك فان بناءها وخواصها هما بشكل عام غير معروفان الا جزئيا وحتى مستوى معين فقط، ولذلك فاننا غالبا مانشبه البناء الداخلي للمنظومة بقسم مصفح من محرك لانستطيع فتحه ، أو كعلبة سوداء (Boite noire) لانستطيع معرفة مكوناتها الداخلية بل ان كل مانعرفه عن هذه المكونات هو سلوكها الاجمالي كما في الشكل رقم (١) .



شكل رقم (١) : مخطط يوضح احدى المنظومات البيئية التي يمكن تشبيهها بعلبة سوداء

فمثلا يمكن معرفة ميزان الطاقة لاحدى الاوراق النباتية عن طريق مواصفات سطحها دون التدخل في التركيب الداخلي لها . في الواقع ، يفرض مفهوم العلبة السوداء نفسه على جميع المنظومات التي يكون فيها التحليل الدقيق لمكوناتها غير ممكن كما هو الحال في منظومة التربة أو منظومة التربة - نبات أو منظومة التربة - نبات - غلاف جوي ، باعتبار أن هناك العديد من الظواهر غير المقاسة بشكل

دقيق ضمن هذه المنظومات . أخيرا فان الاختلاف بين منظومة بيولوجية وأخرى فيزيائية هو اختلاف نسبي باعتبار مفهوم العلبة السوداء يفرض نفسه في مجال الترموديناميك الكلاسيكي (الذي لايعير اهتماما سوى للجوانب المرئية من الظواهر دون اعارة اهتمام للميكانيكية التفصيلية) وكذلك في مجال معظم المنظومات البيئية وعلى مختلف مستويات التنظيم التي يمكن ايضاحها بالمخطط رقم (٢) (OduM,1971)



شكل رقم (٢) : مخطط يوضح مختلف مستويات التنظيم في مجال علم البيئة

١٠٢ – الموديلات (Les modèles) :

مهما تكن حدود المنظومة المادية فانها من الغنى بحيث يصعب ادراكها بتعقيداتها الحقيقية لذلك فاننا نجد أنفسنا مضطرين عند دراستها الى التعبير عنها باستخدام صيغ أبسط هي الموديلات، حيث يمكن تعريف الموديل بأنه عبارة عن وجهة نظر للتعبير عن منظومة ما ، أو بالأحرى عبارة عن تجريد أعد من قبل مراقب للظواهر وذلك بغية الاستعاضة بقدر الامكان عن الدراسة المعقدة الصعبة للمنظومة الحقيقية بدراسة منظومة أكثر بساطة محددة من جميع جوانبها الاساسية والتي نطلق عليها اسم الموديل أو الانموذج. من هنا يمكن أن نستنتج بأن هناك امكانية لتواجد عدد غير محدود من الموديلات الممثلة لنفس المنظومة والتي قد تكون بعيدة عن بعضها، أو قريبة جدا بصورة يمكن معها الانتقال من أحدها الى الاخرى بسهولة .

١٠١٠٢ – المكونات الأساسية للموديلات:

يمكن أن نميز بين أربع مكونات أساسية يتألف منها الموديل هي :

– متحولات الموديل (Variables de modèle) أو مايسمى بمتحولات الحالة (Variables d'état) وهي عبارة عن مجموعة من المكونات أو الرموز يعتمد تحديدها على الهدف الذي يرمي اليه المراقب

لظواهر معينة ،فمثلا يمكن أن نعتبر بأن متحولات الموديل هي وبشكل منفصل ،الكتل الحيوية لمختلف أنواع الكائنات الحية المنتجة والمستهلكة والمفككة الموجودة في منظومة بيئية معينة .

- توابع التحويل (Fonction de transferts) وهي عبارة عن التوابع التي تحدد التأثيرات المتبادلة بين متحولات الموديل .

- التوابع القسرية (Fonctions de contrainte) وهي التوابع التي تحدد تدفق العوامل الخارجية الى داخل الموديل كالتوابع المحددة لشدة الاشعاعات الشمسية الساقطة على سطح طبيعي أو تلك المحددة لهجرة أحد الانواع من الكائنات الحية من منطقة لأخرى وقد يطلق على هذه التوابع في بعض الاحيان اسم المتحولات المستقلة (Variables indépendantes) ، وذلك لأنها لاتتحددعن طريق حالة المنظومة المنمذجة على عكس المتحولات غير المستقلة أو المرتبطة (Variables dépendantes). قد تكون هذه التسمية الاخيرة للمتحولات أوضح تعبيرا في أغلب الاحيان ،ولكن مما يؤخذ عليها أنها تسمية نسبية وذلك لأن متحولا مستقلا في حالة معينة قد يغدو غير مستقل في حالة أخرى ،فعلى سبيل المثال يمكن اعتبار استهلاك الحيوانات في موديل للانتاجية الأولية لمنطقة ما متحولا مستقلا في حين أننا اذا وسعنا الموديل ليشمل مجمل المنظومة البيئية بما فيها الحيوانات لكان هذا الاستهلاك متحولا غير مستقل .

- وسطاء أو " باراميترات " الموديل (Paramètres de modèle)

وهي عبارة عن مجموعة من المتغيرات تتوقف عليها التوابع المحددة للموديل،حيث نستطيع التوصل الى قيمة حقيقية لها عندما نعوضها بعدد حقيقي أو بأنموذج مدروس .

٢٠١٠٢ - حل الموديل وتغيرات حالته:

يتمثل حل الموديل بايجاد قيم لمتحولاته بالتبعية للزمن انطلاقا من معرفة الحالة الأولية لهذا الموديل وتوابعه وثوابته ،حيث يتم ذلك عادة بالطريقة التحليلية أو باستخدام الحاسب الآلي. فاذا عبرنا عن قيم متحولات الموديل (متحولات الحالة) المأخوذة في اللحظة t كما يلي : $X_1(t)$ ؛ $X_2(t)$ و.... $X_n(t)$ فاننا نستطيع تحديد حالة الموديل في هذه اللحظة بالعلاقة التالية :

$$X(t) = [x_1(t); x_2(t); \ldots ; x_n(t)]$$

أو بالشعاع الموجه $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$

أو بشكل آخر $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_n \end{bmatrix}$ ، حيث نقول بهذا الصدد أن الموديل غيّر حالته في المجال (t, t + 1) اذا كان :

$x(t+1) \neq x(t)$ ، أما سرعة التغير في الحالة للمتحول x_i في المجال Δt فتعطى بالعلاقة التالية :

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta t} = \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t)}{\Delta t}$$

حيث يعتبر هذا الشكل قريبا من الشكل الذي تأخذه توابع التحويل التي تكتب عادة بالصور التالية :

$$\Delta x_i / \Delta t = f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n; i_1, i_2, i_3, \ldots, i_n)$$

حيث: $i_1, i_2, i_3, \ldots, i_n$ هي المتحولات المستقلة للموديل المعتبر .

٣٠١٠٢ - البناء الرياضي للموديلات:

يمكن للموديلات أن تكون محددة

أو عرضية ،حيث يكون الموديل محددا عندما تكون التوابع (الدوال) الموضحة لهذا الموديل محددة ،بينما يكون الموديل عرضيا عندما تكون هذه التوابع عشوائية ،ورغم أن الموديلات العرضية أكثر ملاءمة لوصف سلوك المنظومات الحقيقية ،خاصة في مجال علم البيئة الا أنه لسوء الحظ فان هذه الموديلات غالبا ماتقود الى تعقيدات رياضية تحد كثيرا من استعمالها. في الواقع يعتبر البناء الرياضي للموديلات المستخدمة في مجال علم البيئة بسيطا في الحالة العامة وهناك ثلاثة أنماط من الموديلات كثيرة الاستعمال في هذا المجال هي :

٠١٠٣٠١٠٢ الموديلات المجموعاتية (موديلات المجموعات المرتبة) :

يتكون هذا النوع من الموديلات من جداول تشير الى كيفية تغير كل حالة من حالات المنظومة (x_1 , x_2, ... , x_n) بالتبعية للزمن،حيث تعتبر هذه الموديلات موديلات وصفية تسمح بجمع معلومات عن المنظومة ولكنها لاتسمح باكتشاف لأي جديد أساسي .

٢٠٣٠١٠٢ـ الموديلات المصفوفاتية (الموديلات المتريسية) :

هي موديلات تعتمد على استخدام المصفوفات وتستعمل خاصة في مجال دراسة تحولات المادة والطاقة ضمن المنظومة البيئية. فمثلا اذا فرضنا انه لدينا n مكونا $(x_1, x_2, ... x_n)$ لاحدى المنظومات فاننا نتمكن من تمثيل حالة المنظومة في كل لحظة بالشعاع الموجه

$$x = (x_1, x_2, ..., x_n)$$

ويمكن التعبير عن التبادلات بين مكونات المنظومة باستخدام المصفوفة nXn ولنأخذ من أجل ايضاح ذلك الموديل المبسط التالي:

	منتجات	عواشب	لواحم	مفككات
منتجات	X	X	0	X
عواشب	X	X	X	0
لواحم	0	X	X	0
مفككات	X	0	0	X

حيث تعبر هذه المصفوفة عن عدم وجود تأثيرات متبادلة مباشرة بين المنتجات (Producteurs) واللواحم (Carnivores) أو بين المفككات (Décompositeurs) وكل من العواشب (Herbivores) واللواحم .

يلعب هذا النوع من الموديلات نفس الدور الوصفي الذي تلعبه الموديلات المجموعاتية ، ولكن مع ذلك فاننا نستطيع أن نشكل من المصفوفات موديلات كمية وأن نطبق مثل هذه الموديلات لدراسة تحولات المادة والطاقة ضمن المنظومة البيئية .

٣٠٣٠١٠٢ـ الموديلات التفاضلية :

تعتبر الموديلات المصفوفاتية اقل شمولية من تلك المبنية على استخدام المعادلات التفاضلية أو التفاضلات المنتهية . فمثلا نستطيع التعبير عن سرعة تحول عنصرما (ΔX) في واحدة الزمن (Δt) باستخدام

معادلة تفاضلية خطية من الشكل $\frac{\Delta x}{\Delta t} = KX$ أو بصورة تفاضل منته بالشكل التالي :

$\frac{dx}{dt} = KX$. بصورة عامة يمكن أن نعبر عن سرعة تغيرات احدى متحولات المنظومة بالتبعية لقيمته الحالية وللزمن بالشكل التالي : $dx/dt = f(x,t)$

حيث نستطيع عن طريق حل مجموعة المعادلات التفاضلية حلا تحليليا أو باستخدام الحاسب الآلي ، أن نتوصل الى حل المسألة المطروحة .

نستخلص مما سبق بأن الموديلات هي بشكل عام صيغة مبسطة عن المنظومات يمكن دراسة خواصها بطرق التحليل الرياضي، حيث ان لكل موديل استقرارا داخليا، لكنه مع ذلك يتغير تبعا للظروف الابتدائية للمنظومة المدروسة ، من جهة أخرى، وبما أن الموديل يعبر عن منظومة حقيقية فانه من الامور الأساسية في هذا المجال معرفة درجة واقعيته حيث يمكن التوصل الى ذلك عن طريق المقارنة الكمية بين نتائج دراسة المنظومة الحقيقية وبين النتائج المستحصل عليها باستخدام الموديل .

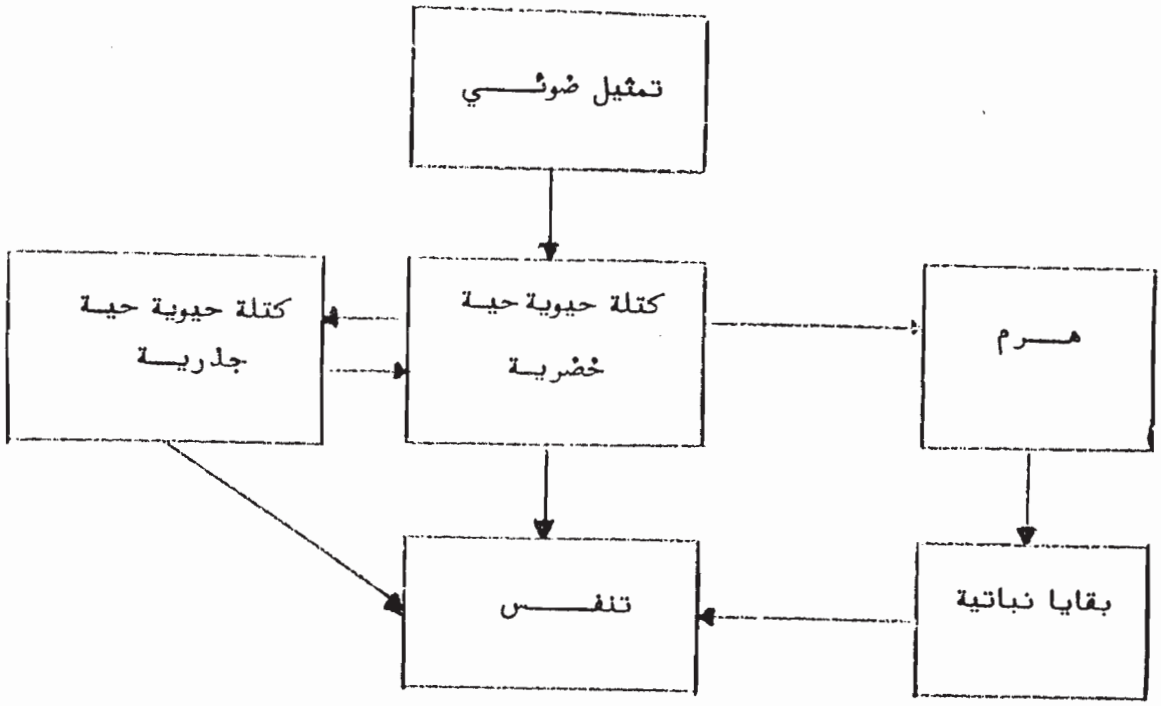
٣ ـ تشكيل موديلات المنظومة البيئية : (Construction de modèles d'écosystème)

سنقوم فيما يلي باستعراض لكيفية وضع المفاهيم التي تطرقنا اليها موضع التطبيق في مجال نمذجة المنظومة البيئية مشيرين هنا الى أننا ، وبغية تسهيل قراءة الموديلات، سنستخدم رسوما تخطيطية لاظهار العلاقات المتبادلة بين الاقسام المختلفة للموديل ، حيث تمثل المستطيلات في هذه الطريقة توابع التحويل ، أما الاسهم التي تربط بين مستطيلين فانها تظهر العلاقة بينهما وتشير الى اتجاه التحول أو الى منحى تدفق المادة والطاقة . لقد اخترنا التطرق الى موضوع تشكيل موديلات المنظومة البيئية من خلال دراسة موديلات الانتاجية الاولية . وموديلات الميزانية المائية للتربة وذلك نظرا للمكانة الهامة التي يتبوآنها على الصعيد البيئي .

١٠٣ ـ موديلات الانتاجية الاولية (Modèles de productivité primair)

لقد أشرنا سابقا بأن التعقيدات في التأثيرات المتبادلة بين مكونات المنظومة البيئية هي التي دفعت بعملية " النمذجة " أو تكوين الموديلات الى الظهور، حيث تسارعت بفضل النظرية المعلوماتية واستعمال الحاسبات الآلية . لقد تركزت الجهود في مجال نمذجة الانتاجية الاولية على المروج الطبيعية ونصف الطبيعية باعتبارها تشكل مصدرا اقتصاديا مهما كونها تغطي قرابة ثلث اليابسة . حيث تجلت هذه الجهود من خلال البرنامج البيولوجي العالمي (P.B.I) الذي دام العمل فيه أكثر من عشر سنوات وشاركت فيه حوالي ٣٠ جامعة ومنظمة تابعة لاثنتي وعشرون دولة . لقد نفذت من خلال هذا البرنامج ابحاثا مهمة وعلى مختلف مستويات المنظومة البيئية خصوصا في مجال تدفق المادة والطاقة وفي مجال الانتاجية الاولية والثانوية . لقد أشرنا سابقا الى أن أول محاولة لنمذجة المنظومة البيئية كانت على يد ODUM عام ١٩٥٧ لكن مع ذلك فان المعادلات الرياضية الخاصة بهذه المحاولة لم توضع الا في عام ١٩٧١ من قبل الباحث Patten رغم أن الباحث Van Dyne كان قبل هذا التاريخ قد وضع موديلا رياضيا اقليميا للمنظومة البيئية للمروج (Van Dyne , 1969) مؤلف من ست مكونات هي : التمثيل الضوئي (Photosynthèse)، الكتل الحيوية الحية (Biomasses vivantes) لكل من

القسم الخضري والجذري للنبات ،الهـــــرم أو الشيخوخة (Senescence) ،المخلفـــات النباتية (Litieres) وأخيـــــرا التنفس (Respiration) المرتبط مع بعضها بتدفق الطاقة (شكل رقم٣) .لقـــد عرفت بعد ذلك العديد من الموديلات الخاصة



شكل رقم (٣) : مخطط لموديل اقليمي للمنظومة البيئية للمروج

بجوانب مختلفة من المنظومة البيئيـة قـام بوضعها العديد من الباحثين أمثـــال :

Seligman , 1976 ; Gounot , 1981 ; Yu, 1982 ; Johnson, 1983 ;El-Khodre 1984 .

في الواقع تتألف موديلات الانتاجية الاولية للمنظومة البيئية بشكل عام من خمسة تحـت موديلات (Sous - modèles) ترتبـط مع بعضها بالعديد من التأثيرات المتبادلة وهي:

ـ تحت موديل لاحيوي (abiotique) مخصص لدراسة تدفق الماء والحرارة ضمن التربة،

ـ تحت موديل مخصص لدراسة ديناميكية الكربون والتطورات الشكلية للمنتجات الاولية ،

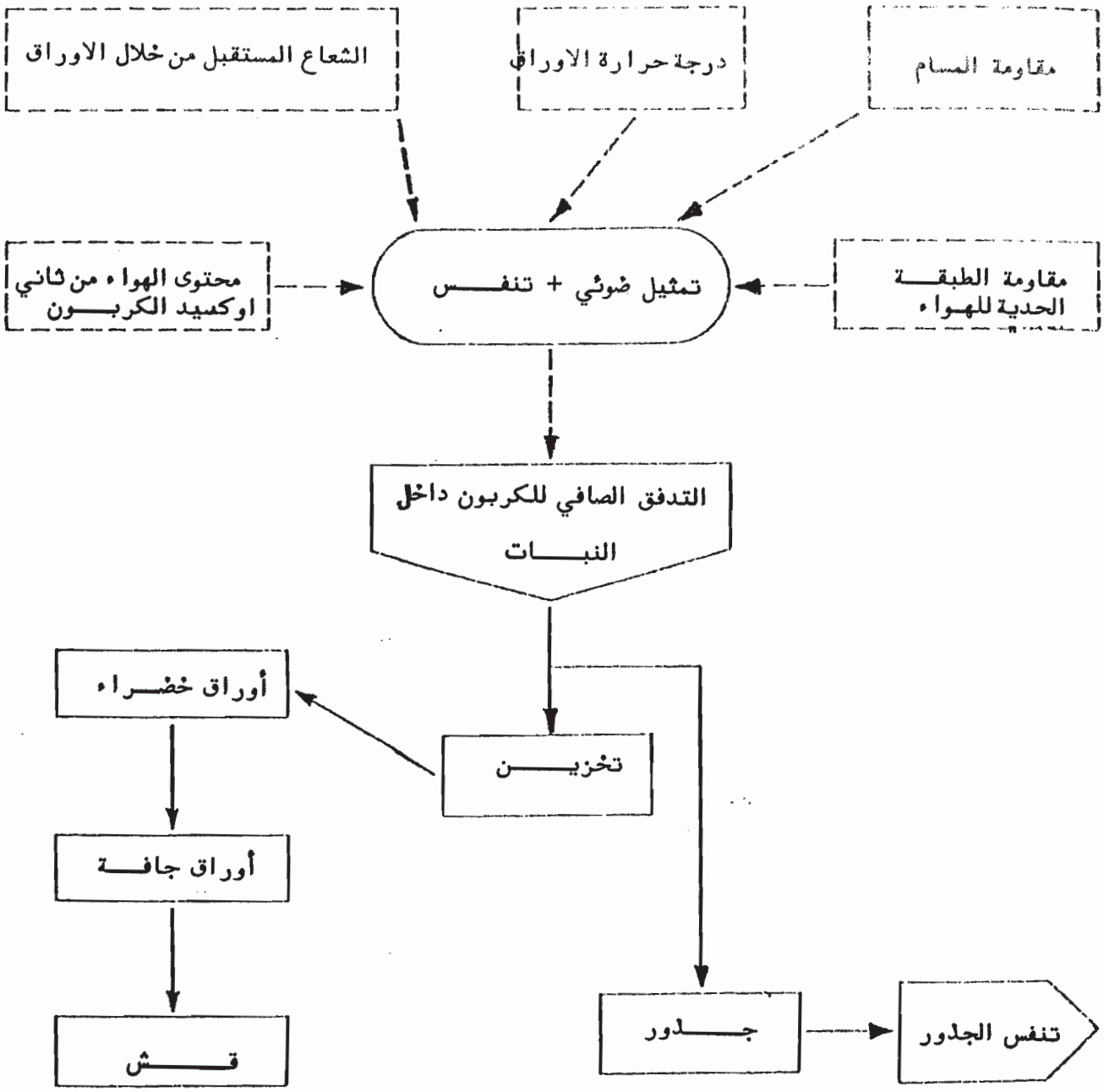
ـ تحت موديل خاص بالمستهلكـــــات حيث يأخذ بعين الاعتبار الثدييات والحشرات،

ـ تحت موديل خاص بالعناصر المغذيـــة حيث يدرس دورات الآزوت والفوسفور والبوتاسيوم وغيرها ،

ـ تحت موديل خاص بالمفككات .

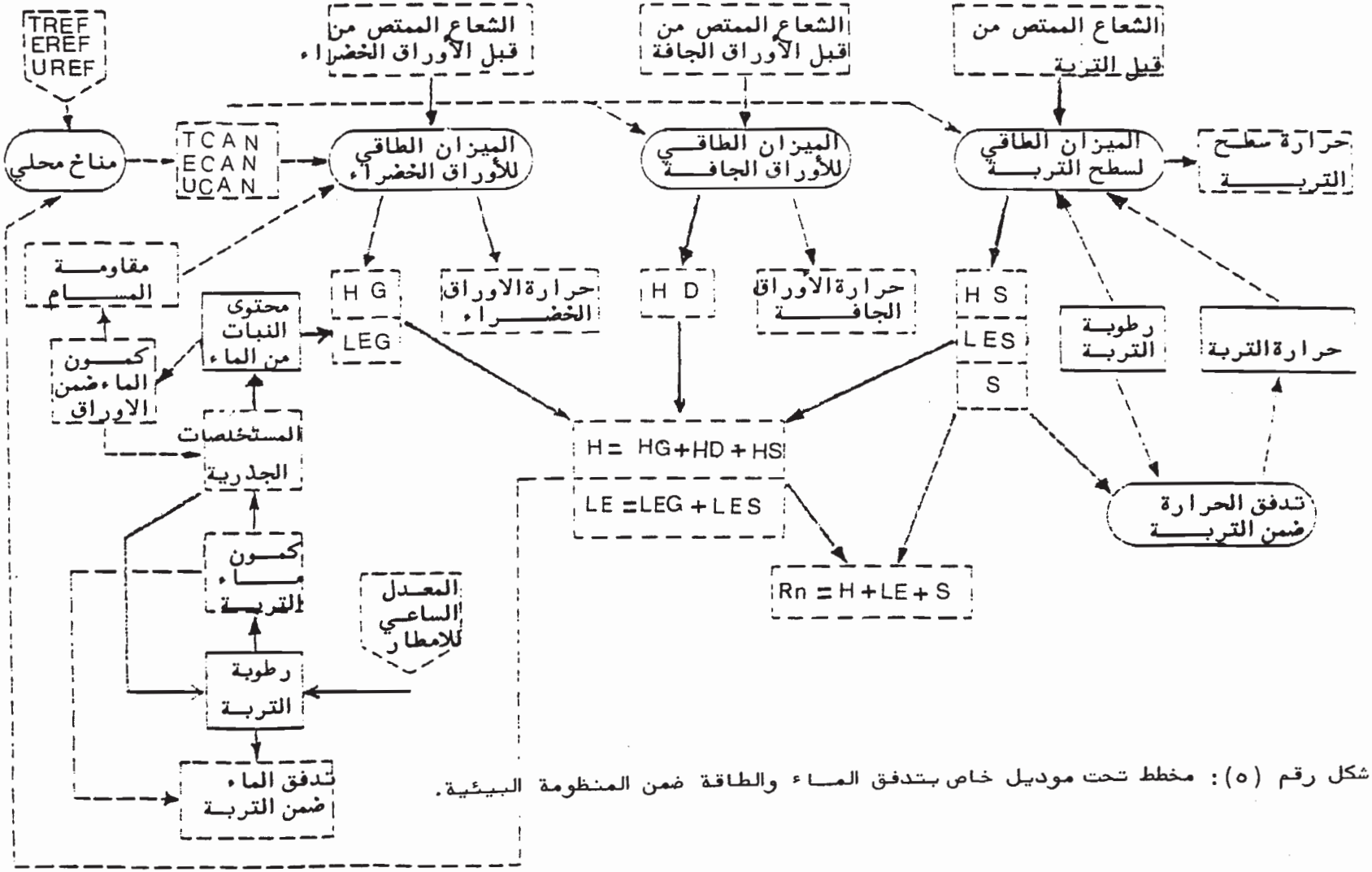
أما من الزاوية الرياضية ،فان موديلات الانتاجية الاولية تكون مؤلفة عادة مـن مجموعة من المعادلات التفاضلية مع مايزيد في بعض الاحيان عن مئة متحول والف ثابت وذلك بغية وصف مكان التجريب وصفـــات النباتات والحيوانات في الطبيعة ومن ثـم دراسة التأثيرات المتبادلة بين العوامـل الحيوية واللاحيوية . بحيث يتم تحديد بعض الثوابت المستخدمة من خلال مؤلفات الباحثين في هذا المجال ،أما الجزء الباقي فيتـم تحديده عن طريق الدراسات والابحاث المخبرية والحقلية . نعرض فيما يلي تحت موديليـن

(Saugier , 1974) أحدهما حيوي (شكل رقم ٤) خاص بالانتاج النباتي والآخر لاحيوي خاص بتدفق الماء والطاقة ضمن المنظومة البيئية (شكل رقم ٥)



شكل رقم (٤) : مخطط تحت ـ موديل خاص بالانتاج النباتي

تمثل الرموز : H ، LE ، Rn ، S على التوالي : تدفق الحرارة الحساسة ، تدفق الحرارة الكامنة ، الشعاع الصافي ، أو الفعال ، تدفق الحرارة ضمن التربة ، أما G و D فهما الاوراق الحية والاوراق الجافة . في حين تمثل الرموز TcAN ، ECAN ، UCAN : حرارة الهواء ، ضغط بخار الماء ، سرعة الرياح على مستوى الغطاء النباتي . أخيرا فان الرموز TREF ، EREF ، UREF تمثل على التوالي: حرارة الهواء ، ضغط بخار الماء وسرعة الرياح على الارتفاع المختار فوق الغطاء النباتي (٦ متر)



شكل رقم (٥) : مخطط تحت موديل خاص بتدفق المـاء والطاقة ضمن المنظومة البيئية.

١٠١٠٣ـ أهداف نمذجة الانتاجية الاولية :

هنا ك العديد من الاهداف التي يمكن تحقيقها باستخدام الموديلات والتي يتعلق القسم الأكبر منها بتمثيل السلوك الفصلي الاجمالي للمحاصيل الحقلية وحيدة النوع الخاضعة لمنا خ متغير، ومن ثم تخمين مردود هذه المحاصيل في ظل ظروف هذا المنا خ حيث يمدنا ذلـ ك ببديل عن التجريب الحقلي ويسمح لنا باتخاذ قرارات سريعة عن مدى ملاءمة أصناف جديدة من النبات للمنا خ المعتبر . من جهة أخرى ،فان هنا ك بعض الموديلات الأخرى التي تقوم بدراسة وتمثيل سلو ك المحاصيل متعددة الانواع ضمن المنظومة البيئية ،حيث تولي أهمية خاصة للتنافس بين هذه الانواع محققة نفس الاهداف المذكورة أعلاه .

٢٠١٠٣ ـ الاسس العلمية لنمذجة الانتاجية الاولية :

لايخرج أعداد الموديلات هنا عن أن يكون تخمينا لتأثير العوامل الخارجية على الانتاجية ،حيث يكمن المبدأ العام في الدراسة المتتالية للتوابع النباتية الاساسية كامتصاص الماء والعناصر المعدنية وكذلـ ك النتح والتنفس والتمثيل الضوئي وذلـ ك في جميع مراحل نمو وتطور النبات مع الأخذ بعين الاعتبار ظروف النمو في مختلف هذه المراحل ،حيث تعتمد التوابع السابقة على الصفات الوراثية للنبات وعلى ظروف الوسط الخارجي المحيط . في الواقع يعتمد نمو وتطور النبات على الصفات الوراثية لهذا النبات وعلى درجة الحرارة والفترة الضوئية ، أما النتح فانه يعتمد على الطلب الطاقي للجو متمثلا بالتبخر والنتح الكامن وعلى مقدرة الجذور على الامتصاص التي تعتمد بدورها على خواص التربة وعلى رطوبتها ومدى انتشار الجذور فيها وعلى توزع ومواصفات المسام . أما التمثيل الضوئي فانه تابع لهندسة القسم الخضري للنبات ولمقدرته التمثيلية الضوئية ولمواصفات المسام ،حيث تعتبر هذه العوامل الثلاث تابعة للصفات الوراثية للنبات . من جهة أخرى فان التمثيل الضوئي يعتمد أيضا على الشعاع الفعال أو الشعاع الصافي (Rn) وعلى درجة الحرارة وعلى النسبة بين التبخر والنتح الحقيقي والتبخر والنتح الكامل (ETR/ETP). ان أكثر التوابع النباتية صعوبة في التعيين هو امتصاص العناصر المعدنية وذلك لعدم وجود ميكانيكية واحدة للامتصاص ولكون بعض هذه الآليات لازالت غير محددة بشكل نهائي وهذا مايفسر سبب عدم ادخال التغذية المعدنية في معظم موديلات الانتاجية الاولية . يتضح مما سبق بأننا وحسب نوع الموديل يجب أن نقوم بدراسة تختلف من حيث التفصيل ،لحدود مختلف التوابع الداخلة فيه ،لكننا وفي جميع الحالات ستكون مضطرين لدراسة الميزانية المائية وذلك لأن رطوبة التربة تؤثر على جميع الميكانيكيات الاساسية ضمن النبات باعتبارها تؤثر على التنظيم المسامي للأوراق وعلى امتصاص العناصر المعدنية واستقلابها داخل النبات وكذلك على عملية التمثيل الضوئي وتكوين المواد الكربوهيدراتية ،لذلك فاننا نمثل عادة الميزانية المائية في موديلات الانتاجية الاولية بتحت ـ موديل مستقل .

٣٠١٠٣ ـ أمثلة على موديلات الانتاجية الاولية :

تقسم موديلات الانتاجية الاولية بصفة رئيسية الى نوعين هما موديلات الانتاجية الاولية لغطاء نباتي وحيد النوع، ومن ثم موديلات أكثر تعقيدا هي موديلات الانتاجية الاولية لغطاء نباتي

متعدد الانواع، حيث يدخل التنافس بين الانواع كاحدى مكونات الموديل. سنكتفي في هذا المجال باستعراض موجز للنوع الاول من هذه الموديلات وهي موديلات مخصصة لوصف سير العمل في غطاء نباتي وحيد النوع وللتنبؤ بانتاجه والتي يمكن تقسيمها بدورها الى نوعين أساسيين هما الموديلات التجريبية والموديلات الديناميكية .

١٠٣٠١٠٣ ـ الموديلات التجريبية :

(Modèles empiriques)

لقد وضعت عدة موديلات تجريبية في مجال الانتاجية الاولية للمحاصيل وحيدة النوع نكتفي هنا بعرض موجز لموديل الباحثين Byrne et Tognetti 1969 كمثال عن هذا النوع من الموديلات . يهدف هذا الموديل الى تمثيل انتاج المادة الجافة و استخلاص ماء التربة مستخدما كمية الامطار والتبخر من الاحواض المائية كمعطيات ارصادية . بالمقابل فان هذا الموديل لم يهتم بدور التغذية المعدنية مستخدما خمسة أيام كوحدة للزمن ، ونورد فيما يلي بعض الفرضيات الاساسية لهذا الموديل :

ـ السيول معدومة ،وآفاق التربة تتشبع تدريجيا بالماء عند ريها أو عند تلقيها لماء المطر .

ـ عندما تكون المادة الرطبة للأقسام الهوائية للنبات أقل من ١٠٠ كغ / هكتار فان التبخر من سطح التربة يكون كبيرا ، اذا توفر الماء بشكل كاف في الطبيعة السطحية من التربة (حتى عمق ١٠ سم)، ويمكن بالتالي مقارنته بالتبخر من سطح مائي .

ـ يحصل الانبات عندما تبلغ كمية الامطار الهاطلة خلال خمسة أيام ١٦ مم ، أو أكثر .

ـ يمكن استنتاج طول الجذور الرئيسية والثانوية ،بالسم في كل سم٣ تربة من الطول النهائي للجذور الرئيسية باستخدام علاقة رياضية مناسبة .

ـ يبدأ تطور الجذور الثانوية عندما تبلغ الجذور الرئيسية طولا قدره ١٥ سم ، وتتوقف عن النمو عندما يكون المحتوى المائي للتربة أقل من ٠٫١٢ سم٣ماء/سم٣ تربة، والذي يتوافق مع نقطة الذبول الدائم للتربة المختارة .

ـ يفترض أن يكون التبخر والنتح الكامن مساويا للتبخر من حوض بخر عادي عندما يزيد معدل انتاج المادة الجافة عن ٦٠٠ كغ/هكتار، أما اذا قل معدل انتاج المادة الجافة النباتية عن ٦٠٠ كغ / هكتار فان التبخر والنتح الكامن يصبح مرتبطا مع التبخر من حوض للبخر بعلاقة خطية (علاقة خط مستقيم) .

ـ عندما يكون التبخر والنتح الحقيقي أصغر من التبخر والنتح الكامن (ETR<ETP) فان تزايد المادة الجافة يكون تابعا خطيا للتبخر والنتح الحقيقي .

ـ ينعدم التبخر و نمو النبات بعد ٢٠ يوما من انحباس المطر أو الري وذلك عندما يزيد عمر النبات عن ٤٠ يوما وتبدأ المادة الجافة بالتناقص بعد توقف النمو .

ـ مقطع التربة متماثل ومقسم الى آفاق بسماكة ١٠ سم ،حيث يشكل كل أفق وحدة متجانسة من حيث الرطوبة وكثافة الجذور .

يختصر الموديل السابق كما نرى من خلال افتراضاته زمنا طويلا من التجريب في مجال حساب الانتاجية الاولية للمحاصيل وحيدة النوع ،لكن مع ذلك فان دقته ليست عالية جدا وذلك بسبب اهماله لبعض الحسابات الخاصة بالكثافة الجذرية وبأقطار الجذور بالاضافة لذلك فانه لم يوفق كثيرا

في اختيار شكل بعض العلاقات الرياضية المستخدمة فيه والتي لم نذكرها تحاشيا لتعقيد الموضوع .

من الموديلات الأكثر تقدما في هذا المجال يمكن أن نذكر الموديل الذي أعده الباحث روز ومساعدوه (Rose etal;1972) حيث طوروا الموديل السابق بأخذهم بالاعتبار التغذية الفوسفورية وكذلك بقيامهم بتمثيل تطور المجموع الجذري للنباتات وبتحديد دوره وأثره في أحداث التبخر والنتح الحقيقي مضيفين بذلك بعض الافتراضات الجديدة على افتراضات الموديل السابق والتي أهمها :

- امكانية استنباط العمق الذي تصل اليه الجذور الرئيسية من خلال الكتلة الحيوية الخضرية .
- عدم تطور الجذور الثانوية الا بعد أن تصل الجذور الرئيسية الى طول يساوي ١٥ سم كما ورد في الموديل السابق ، مضيفين الى انه عندما تبدأ الجذور الثانوية بالتطور فان امتصاص الماء يصبح مقتصرا عليها .

٣ . ٢٠٣٠١ـ الموديلات الديناميكة :

(Modèles dynamiques)

وضع العديد من الباحثين موديلات ديناميكية لتمثيل الانتاجية الأولية لمحاصيل وحيدة النوع ، ومن هذه الموديلات يمكن أن نذكر الموديل الذي قام بوضعه الباحث بلتريدج (Paltridge,1970-1972) والذي يعتبر محاولة جادة لتحديد النشاط الحيوي لغطاء نباتي باستخدام بعض العلاقات الرياضية القادرة على حساب الكتلة الحيوية للغطاء النباتي بتزايدها مع الزمن، وذلك انطلاقا من بعض المعطيات الخاصة بهذا الغطاء ، ومن بعض المعطيات المناخية خاصة منها الشعاع الصافي ، مع تمييز لدور الجذور بعلاقتها مع الميزانية المائية .

باختصار فان أهم المعطيات المتعلقة بالنبات التي تم الاعتماد عليها في هذا الموديل هي التالية :

- سطح الاوراق الذي اعتبر ثابتا من أجل كل طبقة ورقية .
- اتجاه الأوراق وسماكة الطبقات الورقية .
- الناقلية الحرارية لأعناق الاوراق.
- الكتلة السطحية للأوراق .

أبعاد المسام ومقاومتها وكذلك مقاومة طبقة الميزوفيل .

- درجات الحرارة الحدية (الصغرى والعظمى) للفعالية البيوكيميائية للنبات.
- درجات الحرارة الحدية لانغلاق المسام .
- الكثافة العظمى للأوراق النباتية في كل طبقة .
- معامل امتصاص الأوراق للاشعاعات قصيرة الموجة .

أما أهم المعطيات المناخية والمناخية المحلية التي تم ادخالها في هذا الموديل فقد كانت كالتالي :

- الشعاع المنتشر (Rayonnement diffus) عند الظهيرة والشعاع المباشر (Rayennement direct).
- درجة حرارة الهواء ورطوبته النسبية فوق الغطاء النباتي .
- خط العرض واتجاه الرياح .

أما أهم المعطيات التي تم ادراجها في هذا الموديل من أجل ابراز دور الجذور في امتصاص ماء التربة فقد كانت :

- سماكة طبقات التربة والعدد الأعظمي لهذه الطبقات ورطوبة كل منها ،
- أقطار الجذور ومعامل تحويل المادة الجافة لها الى كثافة جذرية .

- الانتشارية المائية للتربة .
- الميزانية المائية للتربة بعلاقتها مع امتداد الجذور .

هكذا فان محاولة الباحث بالتردد جد مشوقة ، خاصة من الناحية النظرية وذلك لاعتمادها على المعطيات الفسيولوجية ، والمورفولوجية والمناخية بآن واحد .

٣ - ٢ - موديلات الميزانيات المائية للتربة (Modèles de bilans hydriques du sol)

تعتمد هذه الموديلات على حساب التبخر والنتح الحقيقي (ETR) باستخدام بعض الصيغ التي تأخذ بعين الاعتبار مايدخل الى التربة وما يخرج منها من ماء خلال فترة زمنية معينة ،ومن بين هذه الصيغ يمكن أن نذكر على سبيل الايضاح الصيغة التكرارية التالية :

$$H_{J+1}=H_J+P_J - D_J - ETR_J - R_J$$

حيث الرمز : H هو المحتوى المائي للتربة ، P - هو كمية الامطار ، D - هو كمية مياه الصرف ، R - هو الجريان السطحي (يعتبر مهملا في معظم الموديلات) أما J و J +1 فهما القياسات الخاصة بالظاهرة المدروسة في اليوم J واليوم الذي يليه (J + 1) . نذكر من انماط الموديلات التي تعالج هذا الموضوع :الموديلات التجريبية والموديلات الديناميكية .

٣ . ٢ . ١ - الموديلات التجريبية :

هي عبارة عن موديلات مبنية على علاقات تجريبية تعتمد على بعض المفاهيم التحليلية لسيرورة ظاهرة ما ، حيث تعمل على تقريب هذه الظاهرة دون الدخول في ميكانيكية مايجري لذلك فقد لاتتفق نتائج هذه الموديلات في بعض الأحيان مع التحليل النظري المعمق . تحتاج الموديلات التجريبية عادة الى عدد كبير من الثوابت والعلاقات الرياضية من أجل أقلمتها مع الحالات المختلفة ، وإلا فانها تبقى محدودة الاستعمال ، اما لكونها لاتنطبق الا على حالة محددة أو لكونها لاتصلح سوى لمناطق مناخية معينة . في الواقع ، لو رجعنا الى الصيغة التكرارية المعروضة في الفقرة (٣ . ٢) فاننا سنجد بأن تحديد الميزان المائي يعتمد بالدرجة الاولى على معرفة التبخر والنتح الحقيقي (ETR) الذي يصعب قياسه في الظروف الحقلية ، لذلك فقد وضعت من أجل حسابه عدة موديلات تجريبية ، فقد وضع الباحث" ايكلمان " (Eaglement , 1971) موديلا اعتمد فيه لحساب التبخر والنتح الحقيقي على التبخر والنتح الكامن (ETP)وعلى معدل رطوبة التربة (H) مستخدما الصيغة التجريبية التالية :

$$ETR=0,732-0,05(ETP)+[4,97(ETP)-0,661(ETP)^2]H-[8,57(ETP)-1,56(ETP)^2]H^2+[4,35(ETP)-0,880(ETP)^2]H^3.$$

حيث H هي معدل رطوبة التربة

$$(H=\frac{wi-wO}{w_1-wO})$$

مع ان wi هي الرطوبة الحالية للتربة ، أما w_1 فهي رطوبة التربة عند السعة الحقلية في حين ان WO تمثل رطوبة التربة عند نقطة الذبول الدائم . ومن الموديلات التجريبية يمكن أن نذكر الصيغة التي قمنا باقتراحها في هذا المجال (د . الخضر ، ١٩٨٩) ، حيث تم الاعتماد فيها لحساب التبخر والنتح الحقيقي على التبخر والنتح الكامن المناخي (ETP) وعلى كمون

الماء ضمن التربة (Ψ_s) معتبرين في هذا المجال بأن التبخر والنتح الحقيقي (ETR) تابع (f) للمتحوليين السابقين أي أن : $ETR = f(ETP, \Psi_s)$.

أما من الناحية الكمية فقد وجدنا العلاقة التالية :

$$ETR = 0,34058 + 0,87908\ ETP - 0,00743\ \bar{\Psi}_s$$

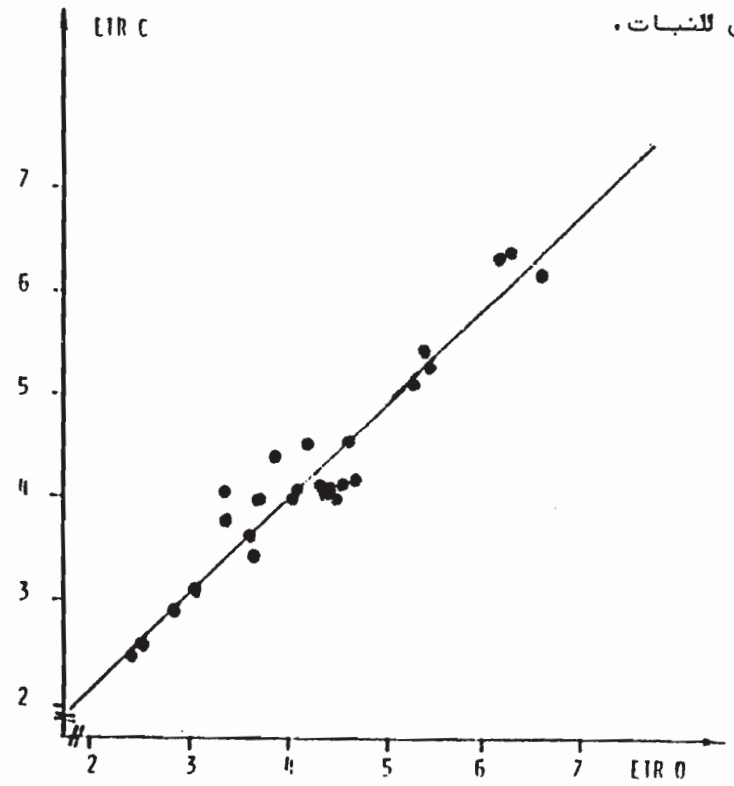
حيث $\bar{\Psi}_s$ هو الكمون الوسطي للماء ضمن التربة معدلا على مختلف الأعماق بدلالة كثافة الجذور :

$$\bar{\Psi}_s = \Psi_1 \cdot \frac{BR_1}{BRT} + \Psi_2 \cdot \frac{BR_2}{BRT} + \ldots + \Psi_n \cdot \frac{BR_n}{BRT}$$

مع العلم ان Ψ_1 , Ψ_2,.. Ψ_n هي كمونات الماء في الطبقات 1 , 2 , ...,n من التربة المشغولة بالمجموع الجذري للنبات.

أما BR_1, BR_2,... BR_n فهي الكتل الحيوية للجذور على الاعماق 1,2,..,n ضمن التربة ، في حين أن BRT تمثل الكتلة الحيوية للجذور في كامل مقطع التربة المعتبر ($BRT = BR_1 + BR_2 + \ldots + BR_n$).

لقد وجد في العلاقة السابقة التي تعطي الـ ETR بدلالة الـ ETP و $\bar{\Psi}_s$ بأن هناك معامل ارتباط قوي (r=0,957) ويوضح الشكل رقم (٦) العلاقة القوية بين قيم التبخر والنتح الحقيقي المحسوبة انطلاقا من الموديل السابق (ETR_c) وبين قيمه المقاسة مباشرة (ETR_o) معبرا عن كل منهما بالمليمتر ماء .



شكل رقم (٦) : العلاقة بين قيم التبخر والنتح الحقيقي المقاسة مباشرة (ETR_o) وبين قيمه المحسوبة (ETR_C) .

٣ ـ ٢ ـ ٢ ـ الموديلات الديناميكية :-

استعملت وطورت الموديلات الديناميكية الخاصة بالميزانيات المائية للتربة من قبل العديد من الباحثين ، ولكنها بالاساس مبنية على أعمال المؤلف (Gardner, 1960-1964)، حيث بين هذا المؤلف باستخدام تحاليل هيدروديناميكية دقيقة بانه يمكن التعبير عن استخلاص الجذور للماء بالمعادلة التفاضلية التالية :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

بحيث يكون :

θ = المحتوى الرطوبي الحجمي للتربة ،

D = معامل انتشارية الماء ضمن التربة ،

t = الزمن ،

r = نصف قطر الجذور التي اعتبرت اسطوانية الشكل غير محدودة الطول.

لقد وجد الباحثان Passioura و Cowan عام ١٩٦٨ حلا للمعادلة التفاضلية السابقة في حال كون تدفق الماء ضمن التربة مستمرا وثابتا وذلك بالشكل التالي :-

$$\theta_1 = \bar{\theta} - \frac{Q}{2D} \left[\frac{r_2^4}{r_2^2 - r_1^2} L_n \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - \frac{3r_2^2 - r_1^2}{4} \right]$$

حيث :

θ_1 ـ المحتوى الرطوبي للتربة في منطقة الجذور معبرا عنه بحجم الماء الموجود في واحدة الحجم من التربة

$\bar{\theta}$ ـ المحتوى الرطوبي الحجمي الوسطي للتربة ،

r_1 ـ نصف قطر الجذور

r_2 ـ نصف قطر قطاع التربة المغذي للجذور بالماء .

L_n ـ اللوغاريتم النيبيري .

Q ـ سرعة استخلاص الجذور لماء التربة .

ان من مزايا مثل هذا الموديل انه يتيح لنا معرفة المحتوى الرطوبي لاحدى طبقات التربة الموجودة على تماس من سطح الجذور اذا عرف تدفق الماء داخل الجذور وقطر وكثافة هذه الجذور وكذلك محتوى التربة من الماء . ضمن هذه الظروف فاننا نستطيع حساب التبخر والنتح الحقيقي اذا عرفنا التبخر والنتح الكامن وطول الجذور مع محتوى التربة من الماء على مختلف المستويات وذلك بشرط القبول بأن تدفق الماء ضمن كل طبقة من طبقات التربة باتجاه الجذور متناسبا مع الكثافة النسبية للجذور الموجودة في هذه الطبقة .

الخاتمة :-

علنا من خلال هذا الاستعراض السريع لتدفق الماء والطاقة ضمن المنظومة البيئية ولنشأة الموديلات الرياضية وتطور استعمالها في مجالات علم البيئة بمساعدة الحاسبات الآلية قد توصلنا الى نقل صورة ولو اجمالية عن هذا الموضوع الواسع ، خصوصا فيما يتعلق باستخدام الموديلات الرياضية الذي يعتبر وبحق قفزة نوعية جديدة وعظيمة في العلوم البيئية سجلتها تباعا الأعوام الثلاثين ونيف المنصرمة ، بحيث نقلتها ، وهي الحديثة ، من مرحلة الوصف لظواهرها الى مرحلة الكم ، ومن مرحلة المراقبة والرصد والقياسات الكثيرة الشاقة لتغيرات هذه الظواهر وللتأثيرات المتبادلة التي لاحدود لها فيما بينها وانعكاسات ذلك على الأحياء الى مرحلة التأمل والتفكير والحصر والابداع .

المراجـــــــع

١ ـ د. الخضر أحمد، ١٩٨٩ ـ علاقة جديدة لحساب التبخر ـ نتح الحقيقـــــي اليومي ، مجلة جامعة تشرين للدراســـات والبحوث العلمية ، المجلد رقم (١١)، سورية اللاذقية (قيد الظهور) .

٢ ـ د. المياس عصام، ١٩٨١ ـ دراسات العلوم المتكاملة (١) في علم البيئـــــة. مشاكل تلوث البيئة الزراعية وتطويـــــر طرق المكافحة فيها ، معهد الانمـــــاء العربي ، لبنان ، بيروت ، ٢٠١ صفحة .

٣ ـ م. نجا معلوف ، ١٩٨٣ ـ موسوعة الحاسبات الآلية ـ لغة الفورتران، الطبعة الاولى ، سورية ، دمشق ، ٢٩٥ صفحة .

4 - Byrne,G.F.; Tegnetti,K.1969 - Simulation of pasture environment interaction.Agric Meteorol.(16), PP. 151 - 163 .

5 - Daget, J., 1976- Les modèles mathematiques en écologie, Ed . Masson, Paris , France .

6 - Dajoz,E., 1971 - Precis d'écologie 2^{e}edition, Ed.Dunod, Paris,France.

7 - Eagleman, J.R., 1971- An experi - mentally derived model for actual evapotranspiration, Agric.Meteorol, (8),PP. 385 - 394 .

8 - El - Khodre,A. - 1984-Interaction chez le dactyle(Dactylis - glomerata L.)de Croissance et du développement vegetatif avec l'alimentation en eau et en azote Application aux bilans hydriques et energetiques et a la productivité d'une culture. Thèse Docteur d'Etat U.L.P., Strasbourg, France, I-Texte 243 P.

9- Gardner,W.R.,1960- Dynamic aspects of water availability to plants. Soil sci.,(89),PP.63 - 73 .

10 - Gardner,W.R.,1964- Relation of root distribution to water uptak and availability.Agron . J.,(56) PP.41-45,

11- Johanson,I.R.,1983 - Nitrate uptake and respiration in roots and shoots : A model,Physiol.plant, (58),PP.145 - 147.

12- Odum,H.T.,1957 - Trophic structure and productivity of silver springs Florida, Ecol. Monoger,(5),PP.129 - 134 .

13- Odum, E.P., 1971 - Fundamentals of ecology . 3th. edition, Sanders, London .

14- Paltridge, G.W,1970 - A model of growing pastur. Agric. Meterol ., 7 (2) PP. 93 - 130 .

15 - Paltridge,G.W.,1972 - Experimental on a mathematical model of a pastur. Agric. Meterol. (10),PP.39 - 54 .

16 - Passioura, J.B.et cowan,I.R. 1968 - on solving the non linear diffusion equation for the radial flow of water to roots.Agric . Meteorol.,(5), PP. 125 - 134 .

17 - Pielou,E.C., 1977-Mathematical ecology , Ed. John wiley & sons, New - york .

18- Preston,F.W.1962 - The canonical distribution of commonnes and rarity. Ecology,(43),PP.185-215

19- Ross,C.W; Begg,J.E.; Byrne,G.F; Torssell,B.W.R.; Goncz,J.H.,1972. A simulation model of growth - fields environment relationships for Townsville stylo pasture . Agric. Meteorol.,(10),PP.161-183.

20- Saugier, B.,1974-Transports de CO_2 et du vapeur d'eau à - l'interface végétion-atmosphère. Interaction du microclimat avec le comportement physiologique de plantes prairiales.Thèse Doc . es sci. u. des sciences et techniques de Languedoc, France .

21- Seligman,N.G.1976- Critical appraisal of some grassland models. In : Arnold, G.W., de wit,C.T,(eds)."Critical evaluation of systems analysis in ecosystems research and management ".Pudoc, wageningan,PP.60 - 97 .

22 - Van Dyne, G.M. 1969 - Grassland mangement,research and teaching viewed in a systems context.Range science Dep.Science, series 3 colorado state univ.

23 - Yu,O.,1982 - Recherches sur la modelisation des écosystèmes prairiaux. Thèse Doc.ès- sci . U.L.P., Strasbourg, France .

o o o
o o

RESUME

Nous avons essayer dans cet article d'expliquer la notion et la structure des modèles , puis l'utilisation de ces modèles , surtout dans le domaine d'écologie végétale. Notre but est de montrer aux écologistes que la mise en modèle , si elle exige beaucoup de connaissances ecologiques, ne fait appel en général qu'à des notions fondamentals de mathématique comme les calculs différentiels et matriciels .

□ □ □ □
□ □